



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم  
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

# THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES AGRONOMIQUES

**Spécialité : Sciences du Sol & Foresterie**

Présentée par

**OUABEL Habib**

**Thème**

---

**Approche dendrochronologique de l'impact des changements  
climatiques sur l'évolution du dépérissement du cèdre  
(*Cedrus atlantica* L.) dans les massifs de l'Ouarsenis (Algérie)**

---

*Soutenue le 25 / 07 /2023 devant le jury composé de*

Qualité	Nom et prénom	Grade	Structure
Président	BENKHELIFA Mohammed	Prof.	Université de Mostaganem
Promoteur	LARID Mohamed	Prof.	Université de Mostaganem
Examineur	MEDERBAL Khalladi	Prof.	Université de Tiaret
Examineur	ABOURA Reda	Prof.	Université de Tlemcen
Examineur	BENDI-DJELLOUL Sidi Mohamed Bahaeddine	Prof.	Université de Tlemcen
Examineur	BOUALEM Abdelkader	MCA	Université de Mostaganem

---

**Année universitaire 2022 / 2023**

## *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes que j'aime et  
en particulier :

A ma mère qui m'a toujours apporté amour et affection

A mon père qui m'a toujours encouragé

A mes frères et mes sœurs

A tous mes amis

A tous mes étudiants en agronomie

## **Remerciements**

*Mes remerciements vont d'abord à ALLAH tout puissant de m'avoir donné la force et la patience de réaliser ce travail.*

*Je tiens tout d'abord à remercier mon Directeur de thèse le Pr **LARID Mohamed**, pour la confiance qu'il m'a témoigné en acceptant de diriger ce travail et pour ses conseils et orientations qui m'ont été très bénéfiques pour la réalisation de cette thèse, qu'il soit rassuré de ma profonde gratitude.*

*Je tiens à remercier tout particulièrement le Pr., **BENKHELIFA Mohammed** de l'Université de Abdelhamid Ben Badis Mostaganem qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury.*

*Je remercie le Pr. **MEDERBEL Khalladi**, de l'Université de Tيارت, le Pr **BENDI-DJELLOUL Sidi Mohamed Bahaeddine** et le Pr **ABOURA Reda** de l'université de Tlemcen et le Dr **BOUALEM Abdelkader** (MCA) de l'université de Mostaganem d'avoir pris patience et intérêt à examiner et juger notre travail de recherche*

*Mes remerciements s'adressent également à mon cher ami **TALEB Mohamed Lamine** pour ses conseils, ses orientations m'ont été très bénéfiques pour la réalisation de cette thèse, qu'il soit rassuré de ma profonde gratitude.*

*Que le personnel du corps des chercheurs et personnel de soutien de la station expérimentale INRF Azazga de Tizi Ouzou pour l'aide précieuse et la sympathie qui m'ont apporté pour la réalisation de la partie des analyses de la dendrochronologie.*

*Mes vifs remerciement d'adressent à **M. GACEMI Abdelhamid**, **M. BELKKEME Mohamed**, **M. ADIME Belkacem**, **M. BOUMAAZA Boualem**, **M. FELLAH Sahnoun** et **M. YOUSEF Rabia** pour leur contribution précieuse à la réalisation de ce modeste travail, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.*

*Une grande part de mes remerciements s'adresse à ma grande famille et ma petite famille pour leur soutien moral, et encouragements au cours de ses longues années d'études.*

## Approche dendrochronologique de l'impact des changements climatiques sur l'évolution du dépérissement du cèdre (*Cedrus atlantica* L.) dans les massifs de l'Ouarsenis (Algérie)

**Résumé :** Avec une vaste étendue et une importante variabilité altitudinale renfermant des étages bioclimatiques allant de l'aride au sub-humide, le massif de l'Ouarsenis abrite les cédraies de Theniet El Had et de Ain Antar où le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* L.) présente un état de dépérissement inquiétant. A partir d'une approche comparative entre l'état du dépérissement et les paramètres éco-dendrométriques, il ressort que l'ANOVA à un facteur au seuil de 95% détermine des relations non significatives sauf pour la circonférence moyenne. Ce qui explique probablement l'influence de l'espace vital sur la vigueur des arbres. Par contre, l'analyse dendrochronologique sur une durée de 130 à 350 années montre que l'épaisseur des cernes moyennes annuelles présente une allure générale régressive avec un enregistrement de fluctuations importantes durant le dernier siècle entre 1936 et 1985 expliquant bien l'impact du changement climatique. L'utilisation du système d'information géographique à travers l'application du NDVI sur des intervalles de cinq années de 1985 à 2020 montre respectivement un maintien délicat de 44% de la superficie de la cédraie de Theniet El Had et, une situation plus attrayante pour la cédraie d'Ain Antar dont la superficie du cèdre est passée de 31 à 36 %. L'étude de l'état inquiétant de ces deux cédraies déstabilisées par des différents naturels et anthropiques nécessite une urgence. Ce qui doit inciter tous les acteurs concernés à prendre conscience de cette situation et se mobiliser pour une meilleure atténuation et adaptation au changement climatique.

**Mots clés :** *Cedrus atlantica* L., dépérissement, changement climatique, SIG, dendrochronologie, Ouarsenis.

## Dendrochronological approach to the impact of climate change on the evolution of cedar dieback (*Cedrus atlantica* L.) in the Ouarsenis massifs (Algeria)

**Abstract:** With a vast extent and a significant altitudinal variability containing bioclimatic stages ranging from arid to sub-humid, the Ouarsenis massif is home to the cedar forests of Theniet El Had and Ain Antar where the Atlas cedar (*Cedrus atlantica* L.) presents a worrying state of dieback. From a comparative approach between the state of dieback and eco-dendrometric parameters, it appears that ANOVA at a factor at the threshold of 95% determines non-significant relationships except for the mean circumference. This probably explains the influence of living space on the vigor of trees. On the other hand, the dendrochronological analysis over a period of 130 to 350 years shows that the thickness of the annual average rings shows a general regressive pattern with a record of significant fluctuations during the last century between 1936 and 1985 explaining the impact of climate change. The use of the geographic information system through the application of the NDVI over five-year intervals from 1985 to 2020; shows respectively a delicate maintenance of 44% of the area of the cedar forest of Theniet El Had and, a more attractive situation for the cedar forest of Ain Antar whose cedar area has increased from 31 to 36%. The study of the worrying state of these two cedar forests destabilized by natural and anthropogenic differences requires urgent intervention. This should encourage all stakeholders to become aware of this situation and mobilize for better mitigation and adaptation to climate change.

**Key words:** *Cedrus Atlantica* L., dieback, climate change, GIS, dendrochronology, Ouarsenis.

## المقاربة بعلم التسلسل الزمني الشجري لتأثير تغيرات المناخ على تطور موت الأرز (*Cedrus atlantica* L.) في كتل الوردسينيس (الجزائر)

على مدى واسع وتنوع ارتفاعي كبير يحتوي على مراحل مناخية حيوية تتراوح من القاحلة إلى شبه الرطبة، تعد جموع الوردسينيس موطنًا لغابات الأرز في ثنية الحد وعين عنتر حيث يمثل أرز أطلس (*Cedrus atlantica* L.) حالة مثيرة للقلق من الموت. من نهج مقارنة بين حالة الموت الرجعي ومعايير قياس الشجرة البيئية، يبدو أن معامل التحليل الإحصائي عند عامل عند عتبة 95 % تحدد العلاقات غير المهمة باستثناء المحيط المتوسط. ربما يفسر هذا تأثير مساحة المعيشة على حيوية الأشجار. من ناحية أخرى، يُظهر تحليل التسلسل الزمني الشجري على مدى فترة من 130 إلى 350 عامًا أن سمك حلقات المتوسط السنوي يُظهر نمطًا تنازليًا عامًا مع سجل من التقلبات الكبيرة خلال القرن الماضي بين عامي 1936 و1985 موضحًا تأثير تغير المناخ. يُظهر استخدام نظام المعلومات الجغرافية من خلال تطبيق مؤشر الغطاء النباتي للفرق الطبيعي على مدى خمس سنوات من 1985 إلى 2020 على التوالي صيانة دقيقة لـ 44 % من مساحة غابة الأرز في ثنية الحد، ووضعًا أكثر جاذبية لأرز الأرز غابة عين عنتر التي زادت مساحة الأرز فيها من 31 إلى 36%. تتطلب دراسة الحالة المقلقة لهاتين غابات الأرز المزعزعة بسبب الاختلافات الطبيعية والبشرية تدخلًا عاجلاً. ينبغي أن يشجع هذا جميع أصحاب المصلحة على إدراك هذا الوضع والتعبئة من أجل التخفيف والتكيف بشكل أفضل مع تغير المناخ.

**الكلمات المفتاحية:** الأرز الأطلسي، الموت، تغير المناخ، نظم المعلومات الجغرافية، علم التسلسل الزمني الشجري، الوردسينيس.

## **Avant-propos**

Le dépérissement est un terme qui fait référence à un processus de déclin ou de dégradation de la qualité ou de la quantité de quelque chose quel que soit sa nature. Cette dégradation peut se produire pour de nombreuses raisons, notamment les conditions environnementales, la maladie, la surutilisation ou l'abus, la pollution, la déforestation, entre autres.

Le dépérissement de la biodiversité a des conséquences graves sur la santé et la stabilité des écosystèmes. Lorsqu'une espèce disparaît, cela peut entraîner un déséquilibre dans la chaîne alimentaire, ce qui peut affecter d'autres espèces et les écosystèmes dans lesquels elles vivent. Il est également important de prendre en compte les causes profondes du dépérissement, telles que le changement climatique et l'exploitation économique, qui ont un impact sur les écosystèmes et la biodiversité.

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* L.) est un arbre emblématique de la région du Moyen-Orient et du Nord de l'Afrique. Le dépérissement du cèdre de l'Atlas remonte à plusieurs décennies. En raison de ces facteurs, le dépérissement du cèdre de l'Atlas est devenu une préoccupation croissante pour les chercheurs, les conservateurs et les gouvernements, qui cherchent à protéger et à préserver cette espèce en danger. Cependant, ces dernières années, un grand nombre d'arbres ont commencé à dépérir et à mourir, mettant en péril la survie de cette espèce.

Cette thèse vise à répondre à la question principale de ce défi en identifiant les causes du dépérissement du cèdre de l'Atlas et en suggérant des solutions plausibles pour l'avenir.

<b>Dédicaces</b>	
<b>Remerciements</b>	
<b>Résumés</b>	
<b>Avant-propos</b>	
<b>Liste des figures</b>	
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Introduction générale</b>	1
<b>PARTIE I : APPROCHE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>Chapitre I : Généralités sur le cèdre</b>	
1.1. Situation actuelle du cèdre	4
1.2. Historique du genre <i>Cedrus</i>	4
1.3. Nomenclature du genre <i>Cedrus</i>	6
1.4. Aire de répartition	6
1.4.1. Aire naturelle	6
1.4.2. Aire d'introduction	7
1.4.3. En Algérie	8
1.5. Caractères botaniques du cèdre	9
1.6. Écologie du cèdre de l'Atlas	10
1.6.1. L'altitude	10
1.6.2. Les conditions climatiques	10
1.6.2.1. La pluviométrie	10
1.6.2.2. La température	10
1.6.1.3. Etages bioclimatiques	11
1.6.2. Conditions édaphiques et milieu végétal	12
1.7. Cycle de reproduction	13
1.8. Entomologie du cèdre de l'Atlas	14
1.9. Dépérissement du cèdre	14
1.9.1. Facteurs de dépérissement	15
1.9.2. La spirale du dépérissement	15
<b>Chapitre II : Le changement climatique</b>	
2.1. Le changement climatique	17
2.1.1. Problématique	17
2.1.2. Causes et conséquences	17
2.1.3. Mesures d'atténuation et d'adaptation	18
2.2. Le CC et le dépérissement des forêts	19
<b>Chapitre III : La dendrochronologie</b>	
3.1. La dendrochronologie	21
3.1.1. Définition	21
3.1.2. Principes	21
3.1.3. Datation d'un arbre	22
3.1.4. Propriétés recherchées	22
3.1.5. Echelle et fiabilité	23
3.2. Applications et méthodes	23
<b>Chapitre IV : Les systèmes d'information géographique</b>	

4.1. Notion des SIG	24
4.2. L'apport du SIG dans la gestion forestière	26
4.3. L'apport du SIG dans l'étude du dépérissement	27

## **PARTIE II : APPROCHE EXPERIMENTALE**

### **Chapitre V : Matériels et méthodes**

5.1. Présentation du massif de l'Ouarsenis	29
5.1.1. Situation géographique de la zone d'étude	30
5.1.2. Délimitation de la zone d'étude	31
5.1.3. Milieu physique	32
5.1.3.1. Relief	32
5.1.3.2. Orographie	33
5.1.3.3. Pente	33
5.1.3.4. Hydrogéologie	34
5.1.3.5. Paramètres climatiques	34
A. Pluviométrie	34
B. Températures	35
C. Neige	37
D. Humidité relative	37
E. Vent	37
5.1.3.6. Synthèse climatique	37
A. Diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gausсен	37
B. Indice d'aridité de Martonne	40
C. Indice de sécheresse estivale de Giacobbe	41
D. Quotient pluviométrique d'Emberger	41
E. Indice de sécheresse de Birot	42
F. Synthèse de la définition des mois secs	43
5.1.3.7. Pédologie	43
5.1.3.8. Occupation du sol	44
A. Répartition des surfaces	44
B. Cartographie de l'occupation du sol	45
5.2. Protocole expérimental	45
5.2.1. Objectifs	45
5.2.2. Choix et installation des placettes	47
5.2.3. Données topographiques	48
5.2.3.1. Altitude	48
5.2.3.2. Pente	48
5.2.3.3. Exposition	49
5.2.4. Données pédologiques	50
5.2.4.1. Échantillonnage de sol	50
5.2.4.2. Analyses physico-chimiques	51
A. Granulométrie	52
B. Humidité	53
C. CEC	53
D. Matière organique	54

E. pH	54
F. Calcaire total	54
G. Conductivité électrique	54
5.2.5. Données dendrométriques	55
5.2.5.1. Hauteur dominante	55
5.2.5.2. Circonférence dominante	55
5.2.5.3. Hauteur moyenne	55
5.2.5.4. Circonférence moyenne	55
5.2.5.5. Densité totale	55
5.2.6. Données dendrochronologiques	55
5.2.6.1. Echantillonnage	56
5.2.6.1. Traitement et analyse	56
5.2.7. Données sur l'occupation du sol	57
5.2.8. Données climatiques	57
5.2.9. Traitement statistique des données (ANOVA et ACP)	57
<b>Chapitre VI : Résultats et discussions</b>	
6.1. Synthèse de l'analyse comparative du dépérissement	58
6.1.1. Relation Dépérissement - Dendrométrie	58
6.1.1.1. Dépérissement – Hauteur Dominante et Circonférence Dominante	58
6.1.1.2. Dépérissement – Hauteur Moyenne et Circonférence Moyenne	59
6.1.1.3. Dépérissement – Densité Totale	60
6.1.2. Relation Dépérissement – Paramètres Ecologiques	61
6.1.2.1. Dépérissement – Altitude	62
6.1.2.2. Dépérissement – Pente	62
6.1.3. Relation Dépérissement – Paramètres physico-chimiques	63
6.1.3.1. Dépérissement – Texture du sol	63
6.1.3.2. Dépérissement – pH du sol	63
6.1.3.3. Dépérissement – Matière Organique	64
6.2. Synthèse de l'analyse dendrochronologique	65
6.3. Synthèse de l'analyse cartographique	65
6.3.1. L'indice de végétation NDVI	78
6.3.1.1. La cédraie de Theniet El Had	78
6.3.1.2. La cédraie d'Ain Antar	88
6.3.2. L'indice de végétation NDVI	88
6.4. Synthèse de l'analyse statistique	97
<b>Conclusion générale</b>	98
<b>Références bibliographiques</b>	100
<b>Annexes</b>	108



<b>Liste des tableaux</b>		
<b>N°</b>	<b>Intitulé</b>	<b>Page</b>
01	Caractères botaniques des quatre espèces du cèdre (Farjon, 1990 et Toth, 2005)	5
02	Mesures possibles pour atténuer le changement climatique et/ou s’y adapter. D’après le GIEC (2014)	19
03	Disciplines actuelles utilisant la dendrochronologie	21
04	Zonage du massif de l’Ouarsenis	31
05	Les six étages climatiques selon Martonne	40
06	Les étages climatiques de massif d’Ouarsenis selon l’indice de Martonne	41
07	Classification des mois d’après Birot	43
08	Analyse de la variance entre variables dendrométriques et le dépérissement	61
09	Analyse de la variance entre variables édaphiques et le dépérissement	65
10	Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l’épaisseur moyenne des cernes et l’évolution chronologique, station 01	66
11	Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l’épaisseur moyenne des cernes et l’évolution chronologique, station 02	67
12	Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l’épaisseur moyenne des cernes et l’évolution chronologique, station 03	68
13	Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l’épaisseur moyenne des cernes et l’évolution chronologique, station 04	69
14	Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l’épaisseur moyenne des cernes et l’évolution chronologique, station 05	70
15	Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l’épaisseur moyenne des cernes et l’évolution chronologique, station 06	71
16	Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l’épaisseur moyenne des cernes et l’évolution chronologique, station 07	72
17	Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l’épaisseur moyenne des cernes et l’évolution chronologique, station 08	73
18	Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l’épaisseur moyenne des cernes et l’évolution chronologique, station 09	74
19	Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l’épaisseur moyenne des cernes et l’évolution chronologique, station 10	75
20	Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l’épaisseur moyenne des cernes et l’évolution chronologique, station 11	76

N°	Liste des figures Intitulé	Page
01	Cèdre de l'Atlas ( <i>Cedrus atlantica</i> L.) dans le massif de l'Ouarsenis Tissemsilt (Algérie)	
02	Carte de distribution naturelle du cèdre de l'Atlas, en noir	7
03	Répartition du cèdre de l'Atlas en Algérie	9
04	Arbre de cèdre de l'Atlas	9
05	Caractères botaniques du cèdre de l'Atlas	9
06	Aire de répartition du Cèdre de l'Atlas en Algérie sur le climagramme d'Emberger	9
07	Ennemis du cèdre de l'Atlas	14
08	Sujets de cèdre dépéris dans les parcs de Theniet El Had et de Ain Antar	15
09	La spirale du dépérissement	16
10	Courbe dendrochronologique (Julien Quiret - l'arbre celtique)	22
11	Schémas des composantes d'un SIG	24
12	Quelques paysages du massif de l'Ouarsenis	30
13	Situation et limite géographique du massif de l'Ouarsenis	30
14	Zone d'étude	31
15	Carte de reliefs du massif de l'Ouarsenis transect Ouest-Est	32
16	L'orographie du massif de l'Ouarsenis	33
17	MNT du massif de l'Ouarsenis	34
18	Précipitations annuelles moyennes des stations du massif de l'Ouarsenis (91 à 21)	36
19	Températures moyennes annuelles des stations du massif de l'Ouarsenis (91 à 21)	36
20	Variabilité de l'humidité à travers les stations du massif de l'Ouarsenis	37
21	Diagrammes ombrothermiques des différentes stations météorologiques (Précipitations et températures mensuelles moyennes : 1991 à 2021)	38
22	Indice de Martonne des stations du massif de l'Ouarsenis (1991/2021)	40
23	Etages bioclimatiques d'Emberger et positions des stations de l'Ouarsenis	42
24	Carte d'occupation du sol du massif de l'Ouarsenis (MATE, 2008 modifiée)	45
25	Cédraies de Theniet El Had avec profil topographique	46
26	Cédraies de Ain Antar avec profil topographique	46
27	MNT de la zone d'étude	49
28	Carte des expositions du parc national de Theniet El Had	50
29	Plan d'échantillonnage de notre zone d'étude (Parc de Theniet El Had)	51
30	Plan d'échantillonnage de notre zone d'étude (Cédraie de Ain Antar)	51
31	Tarière de Pressler	56
32	Table de mesure Lintab5 et logiciel associé TSAPWin	57
33	Relation : Dépérissement - Hauteur dominante	59
34	Relation : Dépérissement - Circonférence dominante	59
35	Relation : Dépérissement - Hauteur moyenne	60
36	Relation : Dépérissement - Circonférence moyenne	60
37	Relation : Dépérissement - Densité totale	61
38	Relation : Dépérissement - Altitude	62
39	Relation : Dépérissement - Pente	63
40	Relation : Dépérissement - Texture du sol	63
41	Relation : Dépérissement - pH du sol	64
42	Relation : Dépérissement - Taux de matière organique	64
43	Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 01)	66
44	Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 02)	67
45	Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 03)	68

---

46	Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 04)	69
47	Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 05)	70
48	Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 06)	71
49	Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 07)	72
50	Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 08)	73
51	Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 09)	74
52	Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 10)	75
53	Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 11)	76
54	Indice de végétation de Theniet El Had (1985)	78
55	Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (1985)	79
56	Indice de végétation de Theniet El Had (1990)	79
57	Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (1990)	80
58	Indice de végétation de Theniet El Had (1995)	80
59	Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (1995)	81
60	Indice de végétation de Theniet El Had (2000)	81
61	Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (2000)	82
62	Indice de végétation de Theniet El Had (2005)	82
63	Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (2005)	83
64	Indice de végétation de Theniet El Had (2010)	83
65	Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (2010)	84
66	Indice de végétation de Theniet El Had (2015)	84
67	Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (2015)	85
68	Indice de végétation de Theniet El Had (2020)	85
69	Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (2020)	86
70	Evolution par espèce des superficies forestières du parc de Theniet El Had (85-20)	87
71	Indice de végétation d'Ain Antar (1985)	88
72	Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (1985)	88
73	Indice de végétation d'Ain Antar (1990)	89
74	Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (1990)	89
75	Indice de végétation d'Ain Antar (1995)	90
76	Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (1995)	90
77	Indice de végétation d'Ain Antar (2000)	91
78	Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (2000)	91
79	Indice de végétation d'Ain Antar (2005)	92
80	Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (2005)	92
81	Indice de végétation d'Ain Antar (2010)	93
82	Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (2010)	93
83	Indice de végétation d'Ain Antar (2015)	94
84	Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (2015)	94
85	Indice de végétation d'Ain Antar (2020)	95
86	Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (2020)	95
87	Evolution par espèce des superficies forestières du parc de Ain Antar (85-20)	96

**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

## Introduction générale

Les forêts, qui couvrent aujourd'hui 30 pour cent des terres émergées de la planète (FAO, 2006), sont transformées rapidement et directement, dans de nombreux endroits, par les impacts de la croissance démographique et de l'essor des économies. Moins évidents sont les effets profonds des changements climatiques en cours sur l'état et la situation des forêts du monde. Des exemples récents de stress et de dépérissement des forêts (défini ici comme un taux de mortalité des arbres clairement plus élevé que les taux habituels), liés à la sécheresse et à la chaleur, font l'objet de documentation dans tous les continents boisés, ce qui permet de commencer à détecter des modèles mondiaux. Le présent article introduit ces modèles et envisage la possibilité que de nombreuses forêts et terres boisées soient menacées aujourd'hui de façon croissante de dépérissement dû au climat. Un article plus exhaustif (Allen et al., 2009) traite de la question de façon beaucoup plus détaillée. Bien que les événements climatiques puissent endommager les forêts de multiples façons, allant des tempêtes de verglas aux tornades et aux ouragans, l'accent est mis ici sur le stress hydrique climatique, provoqué par la sécheresse et les températures élevées.

C'est dans cette même optique que notre travail se dirige et concernera une région (massif de l'Ouarsenis) où se localise des cédraies uniques et exemplaires (Theniet El Had et Ain Antar) menacées par le dépérissement des arbres de cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* L.).

L'Ouarsenis, repose sur une superficie d'environ 10 millions d'hectares, se caractérise par une chaîne montagnarde distinctive de l'Atlas tellien par sa diversité climatique, édaphique ainsi que sa richesse en biodiversité tant végétale qu'animale. Les forêts de l'Ouarsenis sont caractérisées par la dominance de trois espèces disposées selon un gradient altitudinale (Tebani, 2019) soit celles du pin d'Alep, le chêne vert et l'essence noble de l'Afrique du nord le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* L.) qui occupe les hautes altitudes de Sraâ Sidi Abdelkader (Ain Antar) à Boucaid et Djbel El Medad à Theniet El Had.

Pour sa splendeur, le cèdre de l'Atlas de Djbel El Madad a été proclamé en parc national par le colon français en 1923, reproclamé une autre fois après l'indépendance le 23 juillet 1983, montrant l'importance que connaît le cèdre de l'Atlas sur le plan écologique et économique. D'ailleurs la plupart des parcs nationaux en Algérie sont à base de cèdre. En outre, la cédraie d'Ain Antar reposant sur Sraâ Sidi Abdelkader est proposée en parc régional par les services forestiers. Bien que le cèdre de l'Atlas éprouve une attention particulière, il n'en demeure pas moins exposé à des contraintes environnementales et anthropiques menaçant sa pérennité. D'ailleurs, le mois de novembre de l'année 1984 a été une date tragique où les services forestiers

déclarèrent 3000 arbres de cèdre morts sur pied dû à leur dépérissement. Cette situation alarmante a évoqué un point de départ à plusieurs travaux de recherche sur l'origine de ce fléau dont la résultante peut être récapitulée à des maladies et/ou à l'influence du changement climatique.

En se référant à la notion du dépérissement, **(Roy et Gagnon, 1991 in Moore, 1999)** dans leur définition lui adoptent la notion d'un phénomène complexe évolutif aboutissant à la détérioration partielle ou générale de l'arbre conséquemment sa mortalité.

Compte tenu du travail colossal entrepris dans cette thématique, il serait impératif de suivre d'une manière profonde le comportement du cèdre de l'Atlas dans son état actuel tout en prenant en compte la façon avec laquelle ces deux forêts (Theniet El Had et Ain Antar) sont gérées avec une absence totale de plan de gestion à suivre et de travaux sylvicoles sauf ceux effectués pour l'assainissement des arbres morts sur pied.

Ainsi, afin de répondre à cette problématique, notre travail sera réparti en deux grandes parties dont la première sera consacrée à une approche bibliographique et la seconde à l'approche expérimentale, le tout scindé en six chapitres.

Le premier étayera les généralités sur le cèdre (identification générale de l'espèce d'ordre botanique, écologique et édaphique).

Le second et le troisième sur l'apport des SIG et de la dendrochronologie dans ce genre de thématique et le quatrième sur le changement climatique en général et en particulier par rapport au dépérissement du cèdre de l'Atlas.

Le cinquième portera sur l'ensemble des matériels et méthodes utilisés. En premier lieu une description de la zone d'étude sera d'une grande utilité quant à la bonne connaissance du milieu sur le plan écologique, pédologique et climatique pour l'ensemble de la région de l'Ouarsenis qui repose sur une vaste superficie caractérisée par une importante variabilité altitudinale nécessitant une étude climatique particulière pour chaque sous-zone. Et, en second lieu, une description détaillée du protocole expérimental sur les méthodes d'échantillonnage, d'analyses au laboratoire et de traitements statistiques des données recueillies.

Le sixième chapitre sera consacré à une synthèse des résultats obtenus portant d'abord sur l'approche comparative entre le dépérissement et les différents paramètres stationnels dendrométriques, écologiques et physico-chimiques, ensuite sur l'analyse dendrochronologique basée sur les cernes des arbres de cèdre dans un contexte de variabilité climatique sur une large période. Et enfin, sur l'analyse cartographique de l'évolution des surfaces et de l'état des cédraies de Theniet El Had et de Ain Antar suivi d'une interprétation des résultats de l'analyse statistique. Et, une conclusion générale suivie de suggestions.

Par la réalisation de ce travail, nous espérons enrichir la base de données sur ces cédraies pour les futurs travaux de recherche dans cette thématique et constituer un élément d'aide à la décision pour les services concernés et les autorités compétentes afin d'empêcher l'anéantissement des plus belles cédraies de l'Afrique du Nord.

**PARTIE I**  
**APPROCHE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**



# Chapitre I

## Généralités sur le cèdre



**Figure 01.** Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* L.)  
dans le massif de l'Ouarsenis Tissemsilt (Algérie)

### 1.1. Situation actuelle du cèdre

La situation actuelle du cèdre dépend de la région considérée, mais en général, certaines populations de cèdres sont menacées par la déforestation, la fragmentation des habitats, les maladies et les insectes ravageurs. De plus, le changement climatique peut avoir un impact sur la croissance et la survie des populations de cèdres en modifiant les régimes de températures et de précipitations. Malgré cela, de nombreux programmes de conservation et de gestion des ressources sont en place pour protéger les populations de cèdres et gérer les menaces à leur survie.

Le cèdre de l'Atlas présente des écosystèmes typiques du pourtour méditerranéen. Quoiqu'il soit classé espèce noble, son état sanitaire est en perpétuelle dégradation, sous le dire de dépérissement dans le Nord de l'Afrique où il occupe par excellence les hautes montagnes de l'Algérie et du Maroc (**Boudy, 1950**). Le cèdre d'atlas est une espèce endémique depuis l'Antiquité et symbole des hautes montagnes d'Afrique du Nord à l'ouest, dont l'aire de répartition s'étend sur une superficie de 140 000 ha (**Quézel et Médail, 2003**). C'est le cas notamment du phénomène des nœuds et de deperissement des arbres de cedre d'atlas par l'Ouarsenis depuis 1980 (**Kharchoch et al., 2013 ; Sarmoum et al., 2018**).

Ce phénomène, qui a fortement touché toutes les forêts d'Afrique du Nord, et en particulier dans le Parc National Theniet El Had, et Ain Antar l'Ouarsenis et les Aurès (Algérie), est l'expression de phénomènes très complexes, avec de nombreuses blessures. Destruction de l'écosystème de la forêt de cèdres de l'atlas (**Zine El Abidine, 2003 ; Bentoatee et Pareto, 2006**)

Cette situation entraîne non seulement des problèmes sociaux, mais constitue également un frein majeur à l'économie nationale et la met en péril l'un des patrimoines nationaux que représentent ces ressources forestières (**Al-Masoudin et al., 2013**). Des investigations ont été menées mettant en évidence des attaques de parasites du jeu (**Zaremski et al., 2007 ; Abdelhamid et al., 2017**), l'absence de travaux sylvicoles (**Dirac et al., 2008**) et la sécheresse prolongée (**Kharchoch et al., 2013 ; Linares et al., 2013**).

### 1.2. Historique du genre *Cedrus*

La présence de *Cedrus atlantica* en Afrique du nord n'est pas récente. Il y est certainement établi depuis le Pléistocène moyen, voir inférieur. Cependant sa répartition ne fut pas toujours celle que nous connaissons actuellement. Aux pays du Maghreb il a été identifié par le pollen dans le Hoggar (**Pons et Quézel, 1958 in Abdessemed, 1982**), au Sud et au Nord-Ouest de la Tunisie, dans le Rif, le Moyen Atlas et le Haut Atlas Oriental (Maroc), montrant

ainsi la vaste distribution des lointains ancêtres des cèdres (**Nadjahi, 1988**). D'une manière générale, il semble que son ancienne aire naturelle, plus ou moins étendue en fonction des différents paléoclimats, montrait des frontières plus orientales, en Tunisie et méridionales, dans le Haut Atlas, que l'actuelle (**Damblon, 1989**). En plus de cette migration longitudinale et latitudinale, on constate une variation altitudinale de l'arbre au cours du temps.

Le genre *cedrus*, actuellement, comprend quatre espèces appartenant à la famille des pins (*Pinaceae*) connaissant une variabilité distinctive l'une de l'autre (**Tab. 01**). Ces conifères à feuilles persistantes sont de grands arbres majestueux qui ont des feuilles en forme d'aiguilles disposées en spirale sur des branches ligneuses parfumées. Outre le cèdre de l'Atlas, les principales espèces du genre *Cedrus* sont le cèdre du Liban, le cèdre de l'Himalaya et le cèdre de Chypre moins imposant que les précédents.

- *Cedrus atlantica* Manetti (Cèdre de l'Atlas) : Endémique des montagnes de l'Afrique du Nord (Maroc, Algérie). Il est réparti entre l'Atlas marocain et le Rif sur une superficie de 145 000 ha et l'Atlas algérien 23 000ha.
- *Cedrus libani* Barrel (Cèdre du Liban) est arbre au houppier large, d'abord conique puis à cime tabulaire (plate), peut atteindre 40 m de haut. Il occupe les montagnes de la méditerranée orientale avec 1700 ha au Liban, 16 000 ha en Turquie, et quelques centaines d'hectares en Syrie.
- *C. brevifolia* (Cèdre de Chypre) est une espèce endémique des monts Troodos dans l'île de Chypre.
- *C. deodara* (Cèdre de l'Himalaya) est un grand arbre qui peut mesurer jusqu'à 50 m de haut. Il est originaire des forêts tempérées d'altitude sur les contreforts méridionaux de l'Himalaya.

**Tableau 01.** Caractères botaniques des quatre espèces du cèdre (**Farjon, 1990 et Toth, 2005**)

Espèces		<i>C. atlantica</i>	<i>C. libani</i>	<i>C. brevifolia</i>	<i>C. deodara</i>
Taille des aiguilles (cm)		1 à 25	1 à 3,5	0,5 à 1,5	2 à 6
Cônes (cm)	Longueur	5.0 à 8.0	8.0 à 12	5.0 a10	7.0 à 13
	Diamètre	3.0 à 5.0	3.0a 6.0	3.0a 6.0	5.0 à 9.0
Graines (cm)	Longueur	0.8 à 1.3	1.0 à 1.4	0.8 à 1.4	1.0 à 1.5
	Envergure	2.5 à 3.5	3.5 à 4.0	3.0 à 4.0	3.5 à 4.5
Feuille	Couleur	Vert foncé	Vert bleuâtre	Vert bleuâtre	Vert vif
Epoque de pollinisation		mi-septembre	mi-septembre	mi-septembre	mi-novembre
Durée de maturité (an)		2	2	2	1
Habitat naturel		Atlas	Liban	Chypre	Himalaya

### 1.3. Nomenclature du genre *Cedrus*

Le terme « *Kedros* » d'origine grecque, était autre fois le nom du genre *cedrus*. **Toth (2005)** relate l'appartenance du cèdre de l'Atlas à la classe *coniferospidae*, ordre *coniférales*, famille *pinacées* et sous famille *abiétacées*.

Le genre *Cedrus* comprend les espèces d'arbres connues sous le nom de cèdres. La nomenclature scientifique du genre *Cedrus* est la suivante :

- *Cedrus deodara* (Cèdre deodar)
- *Cedrus atlantica* (Cèdre d'Atlas)
- *Cedrus libani* (Cèdre du Liban)

Les cèdres sont des arbres importants pour la construction, les produits forestiers, les jardins d'ornement et les forêts naturelles. La classification du genre *Cedrus* est soumise à des changements en fonction des avancées de la recherche taxonomique et de la compréhension de la relation phylogénétique entre les différentes espèces (**Farjon, 2010**).

#### Taxonomie

- Embranchement : Spermaphytes
- S/ Embranchement : Gymnospermes
- Classe : Vectrices
- Ordre : Coniférales
- S/ Ordre : Abiétales
- Famille : Pinacées
- Genre : *Cedrus*
- Espèce : *Cedrus atlantica* Manetti.
- Non français : Cèdre de l'Atlas
- Nom berbère : Bignoun. Ithguel
- Nom Arabe : El Arz où Medded

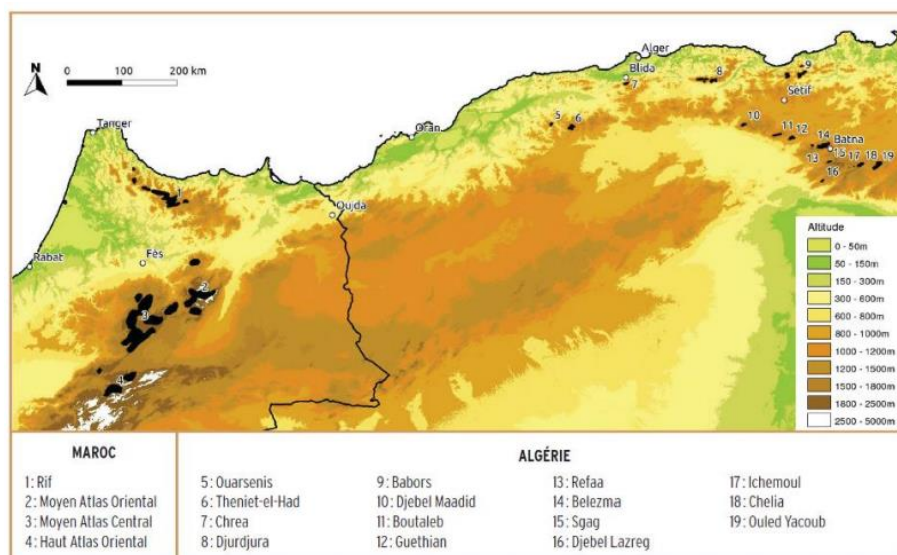
### 1.4. Aire de répartition du cèdre

#### 1.4.1. Aire naturelle

Le cèdre de l'Atlas est localisé sur les montagnes du Maghreb ; le Maroc détient à lui seul la plus grande surface, répartie sur deux blocs d'inégale importance, le premier dans le moyen Atlas et le grand Atlas oriental (116 000 ha), le second dans le Rif occidental et central avec une superficie d'environ 16 000 ha (**M'Hirit, 1982**). En Algérie, les massifs cédraies sont

dispersées et beaucoup plus réduites qu'au Maroc. Le cèdre occupe une surface d'environ 30 000 ha répartie sur deux ensembles naturels, d'écologie sensiblement différente : le premier est localisé sur les montagnes littorales bien arrosées (Babors, massif de Djurdjura, l'Atlas Blidéen, Ouarsenis), ce sont les cédraies humides.

Le second ensemble est le plus important du point de vue superficie, il occupe les montagnes méridionales continentales de l'Atlas saharien, ce sont les cédraies sèches. Il est représenté à l'Est par les cédraies des Aurès et de Belezma, qui couvrent 17 000 ha environ, réparties entre les massifs de Chélia, S'gag, Aidel, Ouled yacoub et du Belezma, à l'Ouest les massifs de Maadid, Boutaleb et Guthiane (Hodna). Ces dernières sont réparties en cantons isolés couvrant environ 8 000 ha (Nedjahi, 1988). La carte que Roche (2006) est utilisé (Fig. 02) donne une bonne idée de la localisation de ces îlots. On trouve d'est en ouest :



**Figure 02.** Carte de distribution naturelle du cèdre de l'Atlas, en noir (Courbet et al., 2012)

#### 1.4.2. Aire d'introduction

Le cèdre de l'Atlas espèce circumméditerranéenne a été utilisé en dehors de son aire naturelle d'abord comme espèce ornementale ensuite comme espèce de reboisement. Les principaux pays dont il a été introduit sont :

- **En France :** Son introduction remonte à 1862, sur le flanc du Mont Ventoux. Depuis lors, la France est en tête des pays possédant des cédraies en dehors de l'aire naturelle de l'espèce. Une des raisons de son importance est son utilisation pour reboiser les grands espaces forestiers laissés libres par les froids intenses, les grands incendies ou encore les attaques d'insectes ravageurs de ces dernières années (Toth, 1980 ; Barriteau et Ferrandes, 1990). Aujourd'hui, *Cedrus atlantica* est présent plus ou moins

abondamment dans 25 départements de la partie méridionale du pays (**Toth, 2005**). *Cedrus atlantica* couvre environ 20.000 ha de forêts avec un taux de boisement de plus ou moins 1.000 ha/an. Sa progression ne devrait pas s'arrêter là, car son aire potentielle serait de 200 000 ha (**Fabre, 1994**). Les forestiers spécialisés estiment qu'il présente de fortes potentialités pour la reconstruction de la forêt méditerranéenne française.

- **En Italie** : Le cèdre de l'Atlas est également utilisé dans ce pays comme espèce de reboisement. Son introduction remonte au 19<sup>ème</sup> siècle, période où il fut planté en Toscane. Depuis, les cèdres peuplent sur près de 1.000 ha plusieurs régions du sud et du centre de l'Italie (**Michele et al., 2001**). **Andrea et Roberto (1994)**, tout comme **Pandolfi et al., (1996)**, renseignent aussi le cèdre au centre de l'Italie, les premiers au sud de la montagne Pratomagno, les seconds dans la région de Marche.
- **En Bulgarie** : Les premiers cèdres de Bulgarie ont été plantés en 1876 (**Delkov et Grozev, 1994**) précisent qu'on peut les trouver dans divers endroits du pays.
- **En Hongrie** : **Csaba (1994)** relate la bonne tenue de *Cedrus atlantica* en Hongrie, avec pour exemple des stations situées dans les montagnes au nord-est du Danube.
- **Et Autres** : **Lasram (1994)** indique que *Cedrus atlantica* L. a été introduit en Russie comme espèce de reboisement, sans donner plus de précisions sur son implantation. **Toth (2005)** parle de l'introduction du cèdre au Portugal en 1935, mais il n'indique pas si ces peuplements ont perduré. **M'hirit (1994)** signale son introduction dans quelques états des Etats-Unis : Pennsylvanie, New York, Côte pacifique. Il cite également des reboisements sur grande échelle en Crimée (Ukraine) et dans le Caucase.

#### 1.4.3. En Algérie

Le cèdre occupe une place hautement appréciable en Algérie, c'est pourquoi l'ensemble des cédraies sont gérées en parcs nationaux. Dans l'ensemble, il couvre environ 23 000ha occupant deux étages bioclimatiques distincts, le premier humide se localisant au Babors, massif de Djurdjura, l'Atlas Blidéen et l'Ouarsenis, le deuxième sec et se localise dans les montagnes méridionales continentales de l'Atlas saharien (**Fig. 03**).

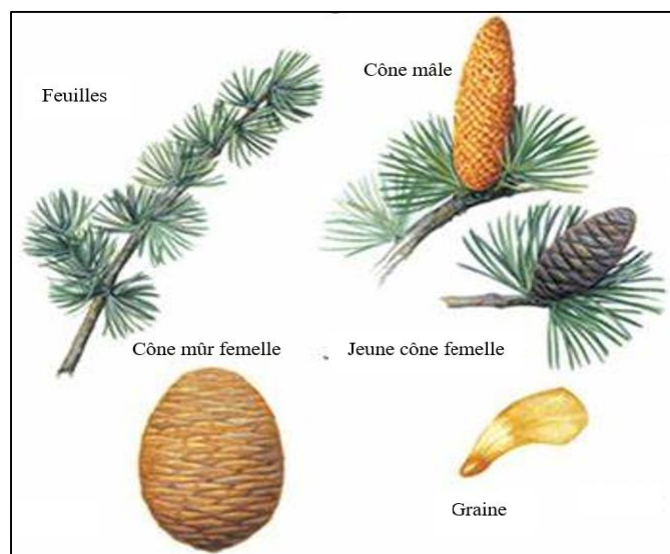


**Figure 03.** Répartition du cèdre de l'Atlas en Algérie (Roche, 2006 modifié par Demarteau, 2006)

### 1.5. Caractères botaniques

Le cèdre de l'Atlas est un arbre majestueux de haute altitude d'une hauteur pouvant dépassée les 40m (**Fig. 05**) une fois les conditions pédoclimatiques sont favorables et dont la densité est intense (**Boudy, 1952 et Toth, 1990**).

C'est un résineux portant des aiguilles persistantes d'une couleur vert glauque (**Fig. 06**) et un système racinaire pivotant puissant (**Debazac, 1968**). C'est une espèce monoïque avec des inflorescences sur les rameaux courts. La floraison est automnale et la pollinisation est anémophile (**Arbez et al., 1978**).



**Figure 04.** Arbre de cèdre de l'Atlas **Figure 05.** Caractères botaniques du cèdre de l'Atlas

## 1.6. Ecologie du cèdre de l'Atlas

### 1.6.1. L'altitude

D'un point de vue altitudinal, **Aussenac et Guehl (1990)** soulignent que le cèdre dans son aire d'origine pousse à des altitudes variant de 1400 à 2200 m, ses limites supérieures et inférieures diffèrent d'une cédraie à l'autre en fonction des conditions climatiques du relief.

**En Algérie**, le cèdre occupe partout les sommets des montagnes (**Derridj, 1990**), il s'installe sur les versants nord, d'une façon générale, à 1400m bien qu'il peut descendre encore plus bas à la faveur de conditions microclimatiques particulière (**Emberger, 1938 et Abdessemed, 1982**). Sur les versants sud, il existe un décalage de 200m en moyenne pour le Chélia mais peut atteindre 400 à 500m comme au Belezma. Les limites inférieures se situent donc sur les versants méridionaux vers 1600m. La limite supérieure est de 2200m pour les deux versants bien que des individus isolés arrivent jusqu'à 2300m (**Abdessemed, 1982**).

### 1.6.2. Les conditions climatiques

Le climat conditionne l'existence même de l'arbre, les principaux facteurs du climat sont l'air, la température, l'eau atmosphérique, les vents, la lumière et les divers phénomènes météorologiques qui en découlent, tels que gelées, givre, verglas, grêle, neige, brouillards, insolation, etc.

#### 1.6.2.1. La pluviométrie

Le cèdre reçoit dans ses pays d'origine des lames de pluies annuelles comprises entre 450 et 1500mm (**Putod, 1979**). En Algérie les cédraies reçoivent une tranche pluviométrique variant de 500mm à 1400mm environ (**Toth, 1980 et Halimi, 1980**). Selon **Benabid (1994)**, cette dernière est largement dépassée, elle atteint 2000mm au Maroc. Dans les cédraies sèches (Aurès, Belezma, Hodna) **le Houerou (1975)** donne 600mm de précipitations comme limites inférieures. Cependant, la répartition des pluies est irrégulière, la saison la plus sèche est l'été ; en effet, **Quezel (1976)** a souligné que les forêts de cèdre du pourtour méditerranéen subissent une sécheresse estivale de 1 à 3 mois.

#### 1.6.2.2. La température

Le cèdre croît sous des températures moyennes annuelles comprises entre 8 et 40 C (**Boudy, 1950 ; Pujos, 1964 ; Toth, 1980 ; Derridj, 1990**). En ce qui concerne les températures moyennes des minimas du mois le plus froid, les cédraies peuvent tolérer des valeurs comprises entre « -1 » et « -8 » C0 (**Benabid, 1994 ; Quezel, 1980**). Par ailleurs **le Houerou (1975)** donne



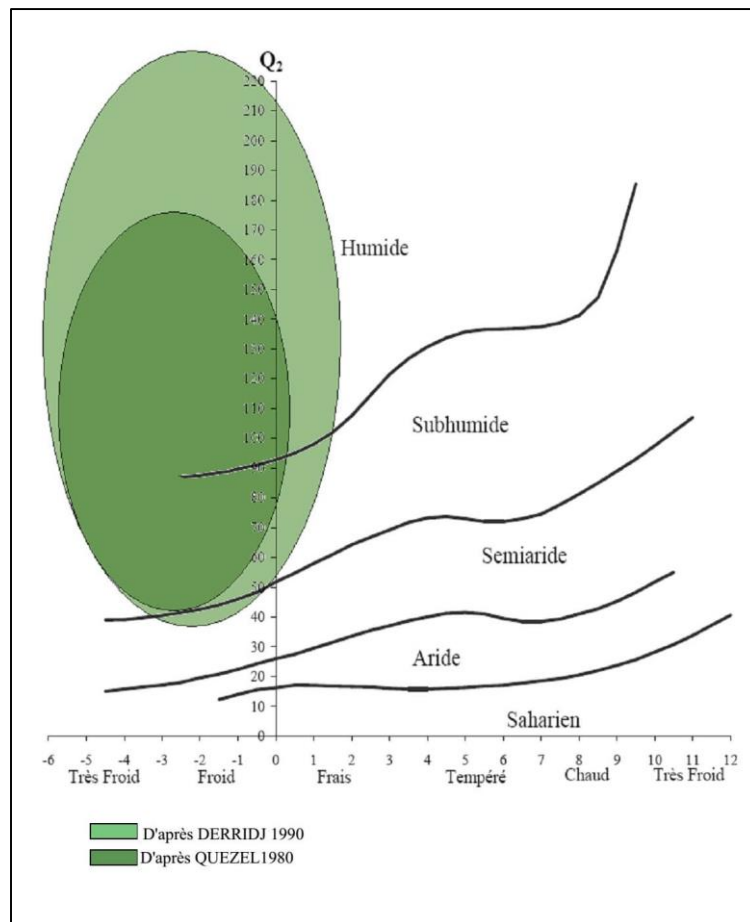
les valeurs suivantes pour les cédraies de l'Aurèse, Belezma et Hodna « -2 C0 » caractérise la limite inférieure et « -5 C0 » pour la limite supérieure. Le cèdre résiste à « -25 C0 » en atmosphère sèche (**Gausse, 1967**), il vit dans ses pays d'origine avec des extrêmes absolus de « -25 C0 » et « +35 C0 » (**Putod, 1979**).

### 1.6.2.3. Etages bioclimatiques

Selon la classification d'Emberger, le cèdre de l'Atlas se trouve dans divers étages bioclimatiques : les étages semi-arides à hiver froid et humide, sub-humide à hiver froid, humide à hiver froid et humide et humide à hiver frais (**Aussenac, 1984**). Mais il trouve son optimum écologique dans le bioclimat méditerranéen humide à hiver froid. Quand le bioclimat devient humide et plus doux, le cèdre est fortement concurrencé par d'autres espèces. En Algérie **Medour (1994)** souligne que les cédraies septentrionales (Atlas Blidéen, Djurdjura et le massif de Babors) sont soumises à un bioclimat humide, variante fraîche voire perhumide. Tandis que la majorité des cédraies méridionales (Aurèse, Belezma, Hodna) sont soumises aux bioclimats subhumides froid et très froid (**Abdessemed, 1984 et M'hirit, 1982**). Notons que **Abdessemed (1982)** a signalé la présence de cette espèce dans les Aurès sous le bioclimat semi-aride supérieur. La figure 04 montre son aire de répartition sur le climagramme d'Emberger.

Une espèce montagnarde par excellence, le cèdre se voit sur une marge altitudinale variant entre 1400 et 2200 m pouvant descendre dans certaines régions à 1000 m (cas de l'Atlas Méridjien) (**Aussenac et Guehl, 1990 ; Medour, 1994**). L'étage bioclimatique optimal de l'espèce est le subhumide à humide avec hiver froid à très froid (**fig. 06**) (**Quezel, 1979, Achhal et al., 1980 ; M'hirit, 1982 ; Harfouche et Nadjahi, 2003**).

L'amplitude pluviothermique du cèdre varie entre 450 et 1500 mm et entre -24°C et 40°C (**Pujos, 1964 ; Putod, 1979 ; Halimi, 1980 ; Derridj, 1990 ; M'Hirit, 1994 ; Benabid, 1994 ; Yahi, 1995**), ce qui classe cette espèce comme rustique, une qualité fortement appréciable dans le choix des essences de reboisement.



**Figure 06.** Aire de répartition du Cèdre de l'Atlas en Algérie sur le climagramme d'Emberger

### 1.6.3. Conditions édaphiques et milieu végétal

Sur le plan édaphique, le cèdre de l'Atlas se développe sur des substrats calcaires (Quezel, 1980). Au nord d'Afrique, il s'accroît mieux sur les calcaires plus ou moins compacts du lias ou marneux du jurassique moyen, que sur les schistes calcaires ou gréseux ou les grès (Serge Elmi, 2007) Dans l'ensemble, le cèdre de l'Atlas trouve son optimum dans les sols meubles (Sazonov, 1976 in Beghami, 2003).

Les cédraies circum-méditerranéennes sont d'une façon générale localisée sur substrats calcaires (Quezel, 1980). En Afrique du Nord, le cèdre de l'Atlas se rencontre aussi bien sur les calcaires plus au moins compacts du lias ou marneux du jurassique moyen, que sur les schistes calcaires ou gréseux ou les grès. Les neuf dixième (9/10) des cédraies Algériennes se localisent sur les formations siliceuses et en bien moindre proportion sur les calcaires du crétacé (Boudy, 1950).

D'une façon générale il semble que c'est l'aspect physique du substrat qui joue le rôle le plus important dans le comportement écologique, plutôt que l'aspect chimique (Yi, 1976 in Beghami, 2003). Le cèdre n'a pas d'exigences particulières pour le sol, mais ne vient pas dans

les sols tourbeux ou humides (**Gaussen, 1967**). Il redoute les sols mal drainés, asphyxiants, hydromorphes et la texture argileuse lui est défavorable (**Toth, 1971**).

Les espèces végétales associées au cèdre sont différentes selon les conditions écologiques, c'est à dire la pluviométrie, l'altitude et les conditions édaphiques. La richesse floristique des cédraies est estimée à un millier d'espèces dont environ 10% d'arbres, 15% d'arbustes et arbrisseaux et 75% de plantes herbacées annuelles ou pérennes. (**M'Hirit et al., 1999**).

Son association végétale, sous forme de futaie dense, présente deux types bien distincts :

- Un faciès relativement sec qui est surtout celui de l'Algérie que l'on retrouve aussi au Maroc dans le grand Atlas Oriental, avec l'Erable de Montpellier, le Pin d'Alep, le Chêne vert, le Genévrier thurifère, le Frêne dimorphe, l'Épine vinette d'Espagne, l'Aubépine monogyne, le Buis des Baléares, etc.
- Un faciès humide avec le Houx, le Chêne vert, les Erables, le Mérisier, l'Alisier blanc, l'If, le Ciste à feuille de Laurier, le Daphné, la Pivoine, la Digitale, le Cyste, les Ronces, etc. (**Boudy, 1950**).

Plusieurs champignons, lichens et mousses apprécient aussi l'ambiance humide des cédraies. Certaines sont exclusives du cèdre. Ces champignons peuvent être fort utiles à l'arbre. Certains ectomycorhiziens protègent ses racines par différentes voies (barrière mécanique, production de substances antibiotiques, etc.) (**Toth, 2005**).

Donc le cèdre participe à des groupements très variés dans des conditions écologiques très diverses allant du semi-aride à l'humide et sur différents substrats (**Abdessemed, 1981**).

### 1.7. Cycle de reproduction

Espèce monoïque, les cônes mâles se développent sur des arbres âgés d'environ 15 ans et femelles à un âge de 17 ans. Les cônes murs mesurent environ 8 cm sous la forme de tonneau, d'une couleur variant du vert pourpre au pourpre brun. Au bout de 2 à 3 ans les cônes arrivent à maturité et se désarticulent sur l'arbre libérant ainsi des graines munies d'ailes. Le cycle de reproduction peut se résumer comme suit (**Till, 1985**)

- Année 1 Apparition des cônes
- Année 2 Fécondation et croissance des cônes
- Année 3 Maturation et leur désarticulation des cônes

La dissémination des graines est anémophile, la plus grande partie tombe dans un rayon d'environ 10 m de l'arbre, d'autres peuvent dépasser les 100 m, selon l'intensité des vents.

### 1.8. Entomologie du cèdre de l'Atlas

Le cèdre de l'Atlas comporte trois types d'ennemis naturels : les phytophages, les xylophages et les maladies cryptogamiques (**Chennaf, 2007**). Parmi les espèces qui attaquent le cèdre il y a *Coptotermes formosanus* (**Fig. 06**), les plus cités sont la tordeuse *Acleris undulana*, *Ampeudus cinnbarinus* qui s'attaquent au genre *cedrus* et la processionnaire *Thaumetopoea bonjeani* (**Agenjo, 1941 ; Mouna, 1994**).



**Figure 07.** Ennemis du cèdre de l'Atlas (**Photos prises par Ouabel H. le 24/03/2022**)

### 1.9. Dépérissement du cèdre

Le dépérissement est un terme symptomatologique définit comme une altération totale ou partielle d'un arbre s'exprimant par la réduction de la vigueur, le dessèchement de la partie aérienne, la réduction de la masse foliaire ou encore la mortalité totale de l'arbre (**Delatour et Guillaumin, 1984**).

Les chercheurs définissent le dépérissement comme étant un phénomène complexe évolutif, dû à un ou plusieurs facteurs interagissant indépendamment ou en synergie, causant la dégradation de l'état sanitaire de l'arbre aboutissant, le plus souvent, à la mort de l'arbre (Figure 6). Son action peut s'étaler jusqu'à plusieurs années (**Manion, 1991 et Landman, 1994**).

Le dépérissement des forêts fut observé depuis la fin des années 1970 en Amérique du Nord (**Ford et Brooks, 2002**), ensuite en Europe centrale et occidentale (**Bonneau et Landman, 1988**) et aux alentours des années 80 l'Afrique du Nord ressent des sujets dépéris (**Anonyme, 1994 et Zine El Abidine, 2003**). Toutefois, plusieurs recherches indiquent la présence du dépérissement à des dates plus anciennes (**Boudy, 1950 ; Landman, 1994 ; Gagnon et Roy, 1994**).



**Figure 08.** Sujets de cèdre dépéris dans les parcs de Theniet El Had et de Ain Antar

### 1.9.1. Facteurs de dépérissement

Bonneau, 1994 ; Abdendi, 2003 ; Guillaumin et *al.*, 2005 ; Vennetier, 2012 regroupent les facteurs de dépérissement en trois principaux facteurs (**fig. 07**)

**1. Les facteurs prédisposant** sont des facteurs abiotiques agissant sur une longue période intervenant dans l'affaiblissement de la vigueur de l'arbre ; tel que le changement climatique, le déficit hydrique, faible espace vital etc...

**2. Les facteurs déclenchant** sont des facteurs abiotiques ou biotiques agissant pendant une courte période d'une façon intense sur les tiges déjà affaiblis causant, ainsi, l'installation des maladies sur l'arbre.

**3. Les facteurs aggravant** sont des agents biotiques amplificateurs des symptômes précédents finissant par la mortalité de l'arbre.

### 1.9.2. La spirale du dépérissement

La spirale de dépérissement désigne souvent un cercle vicieux ou un mécanisme de rétroaction négative qui peut conduire à la dégradation continue d'une forêt ou d'un écosystème forestier (**fig. 09**).

Lorsque la spirale de dépérissement se produit, la forêt ou l'écosystème forestier peut perdre sa capacité à soutenir la vie, ce qui peut entraîner la disparition des espèces végétales et animales qui y habitent. Il est important de prendre des mesures pour prévenir la spirale de dépérissement et de travailler à la restauration des forêts et des écosystèmes forestiers dégradés. (Bini & Ribeiro, 2017).

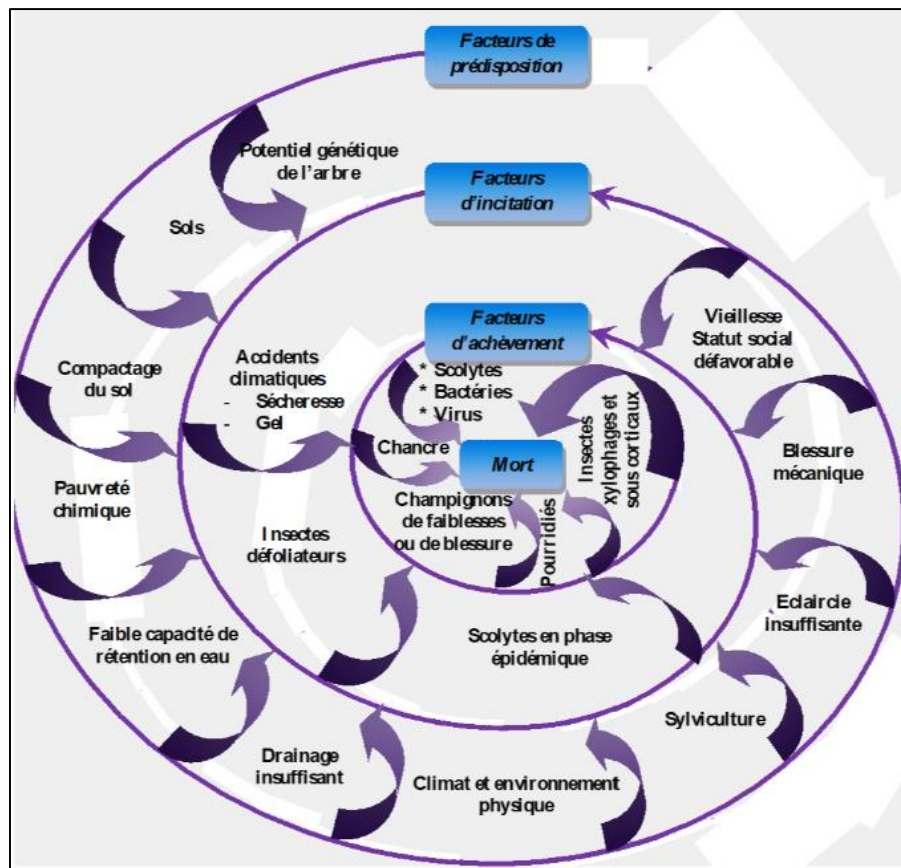


Figure 09. La spirale du dépérissement (Manion, 1981 in M'hirit et Benzyane, 2006)

# **Chapitre II**

## **Le changement climatique**

## 2.1. Le changement climatique

Le changement climatique d'origine humaine affecte déjà de nombreux extrêmes météorologiques et climatiques dans toutes les régions du monde.

Ce changement climatique peut avoir de graves conséquences sur les écosystèmes, les ressources naturelles et la vie humaine. De nombreux pays et organisations internationales travaillent ensemble pour réduire les émissions de GES et développer des stratégies pour faire face au changement climatique (**World Meteorological Organization, 2019**).

### 2.1.1. Problématique

L'augmentation accélérée des concentrations de GES dans l'atmosphère amplifie le phénomène naturel d'effet de serre. Malgré cet avertissement, et bien que les changements climatiques soient déjà perceptibles, les émissions de GES des pays développés augmentent continuellement, année après année. Bien que la science actuelle ne puisse pas clairement confirmer si le changement climatique conduira réellement à une augmentation de l'intensité du cycle El Niño/La Niña, à une augmentation de la fréquence des ouragans ou des tempêtes majeurs, ou à une augmentation du nombre de violentes tempêtes ou de vagues de chaleur, il n'en demeure pas moins que l'élévation de la température atmosphérique entraînera des modifications de la carte de la végétation et du couvert forestier dans le monde avec l'inéluctabilité de la répartition des événements météorologique. Par le terme « dégradation des forêts » la FAO désigne « des changements au niveau de la forêt qui affectent négativement la structure ou la fonction du peuplement forestier ou du site, réduisant ainsi la capacité à fournir des produits et/ou services ».

### 2.1.2. Causes et conséquences

**Origine naturelle :** Un tiers des rayons du soleil que reçoit la terre est renvoyé par elle dans l'atmosphère sous forme de rayonnement infrarouge ; les deux tiers restants étant absorbés par les océans et les sols. Des gaz naturellement présents dans l'atmosphère, comme l'ozone, la vapeur d'eau, le protoxyde d'azote, le méthane ou le dioxyde de carbone, empêchent une partie de ce rayonnement de s'échapper dans l'espace et le renvoient vers la terre, ce qui la réchauffe. C'est l'effet de serre.

**Origine humaine (anthropique) :** L'homme a modifié cet équilibre en envoyant de grandes quantités de gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis les premières révolutions industrielles jusqu'à nos jours. En cause également la déforestation, les forêts ayant un rôle de captage du CO<sub>2</sub>. Sa présence dans l'atmosphère peut durer plusieurs centaines d'années. Ce



phénomène est bien observé dans les forêts du Massif Ouarsenis, avec des boisements précoces.

Depuis la fin du XIXe siècle, la date de fructification a été avancée de 15 jours en moyenne. La récolte des autres cultures pendant au moins 15 jours a été introduite depuis 30 ans au niveau de la région de l'Ouarsenis. La sécheresse et les tempêtes fragilisent également les forêts et les zones boisées.

### 2.1.3. Mesures d'atténuation et d'adaptation

Les mesures d'atténuation et d'adaptation sont des actions prises pour réduire les impacts du changement climatique et s'adapter à ses effets.

Voici quelques exemples de mesures d'atténuation

- **Énergies renouvelables** : la transition vers des sources d'énergie propre telles que l'énergie solaire, éolienne et hydroélectrique peut réduire les émissions de gaz à effet de serre.
- **Effacement de carbone** : les projets d'effacement de carbone, tels que la plantation d'arbres ou la restauration des terres, peuvent aider à absorber le dioxyde de carbone de l'atmosphère.

Voici quelques exemples de mesures d'adaptation

- **Agriculture** : les pratiques agricoles peuvent être modifiées pour s'adapter aux effets du changement climatique, telles que la culture de variétés de plantes plus résistantes à la sécheresse ou à des températures extrêmes.
- **Infrastructure** : la construction d'infrastructures plus résistantes aux inondations et aux tempêtes peut aider les communautés à mieux faire face aux impacts du changement climatique (IPCC, 2014).

Les réflexions à mener portent d'une part sur la meilleure façon d'éviter ou de limiter une aggravation du réchauffement climatique et de ses effets (atténuation). Par exemple, produire de l'électricité au moyen d'une centrale éolienne plutôt que d'une centrale au charbon permet d'éviter les effets des émissions de CO<sub>2</sub> que la centrale au charbon enverrait dans l'atmosphère. Il est cependant aussi nécessaire de trouver des stratégies d'adaptation aux conséquences du changement climatique notamment celles qui sont déjà établies. Il sera par exemple indispensable de faire face à l'élévation du niveau de la mer

Les habitants des régions menacées par ce phénomène devront s'y adapter en se déplaçant (Jouzel & Debroise, 2014 et OFEV, 2018).

**Tableau 02.** Mesures possibles pour atténuer le changement climatique et/ou s'y adapter. D'après le **GIEC (2014)**

<b>Atténuation Mesures visant à atténuer ou à éviter les conséquences du changement climatique Exemples</b>	<b>Adaptation Mesures visant à s'adapter aux conséquences du changement climatique Exemples</b>
Recyclage	Prévention des catastrophes
Passage aux énergies renouvelables	Systèmes d'assurance
Réduction des longues distances entre lieu de domicile et travail, et pour les déplacements en général ; choix des moyens de transport	Renforcement de la participation citoyenne et de l'implication dans la vie politique
Bâtiments neufs exemplaires en termes d'efficacité énergétique	Systèmes d'alerte précoce
Gestion durable des forêts	Abris
Limiter / éviter les gaspillages dans la chaîne alimentaire (production – transport et transformation – distribution - consommation)	Gestion des eaux de pluie et des eaux usées
Modification du régime alimentaire (moins de viande)	Digues, remblais
Formes de villes plus compactes (lutte contre l'étalement urbain)	Dessalement
Tous les changements de comportement et toutes les démarches visant à réduire la demande d'énergie	Incitations financières

## 2.2. Le Changement climatique et le dépérissement des forêts

Le changement climatique peut avoir un impact important sur la santé des forêts et sur la déforestation. Certains des impacts du changement climatique sur les forêts incluent des températures plus élevées, des périodes de sécheresse plus fréquentes et plus longues, et une augmentation de la fréquence et de l'intensité des incendies de forêt,

De nombreux travaux ont été réalisés sur les impacts du changement climatique sur les forêts et sur les moyens de les atténuer. Voici quelques exemples de travaux importants sur ce sujet :

- Impacts, Vulnerability, and Adaptation in Forest Ecosystems" (**IPCC, 2007**)
  - Ce rapport de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) examine les impacts potentiels du changement climatique sur les forêts et les options d'adaptation.
- Forests and Climate Change: A Synthesis of Current Knowledge" (**FAO, 2013**)
  - Ce rapport de la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) présente une synthèse des connaissances actuelles sur les impacts du changement climatique sur les forêts et les options d'adaptation.

- "Projecting future changes in forest disturbance regimes and their ecological and social consequences" (**Westerling et al., 2006**)
- - Ce travail de recherche examine les projections de l'impact futur des perturbations climatiques sur les régimes de perturbation des forêts et leurs conséquences écologiques et sociales.
- "The Role of Forests in Mitigating Climate Change" (**UNEP, 2015**)
  - Ce rapport de l'United Nations Environment Programme (UNEP) examine le rôle des forêts dans la lutte contre le changement climatique.

En cherchant dans les bases de données scientifiques avec les mots-clés « mort des forêts » ou dégradation, on constate que le nombre de cas graves recensés dans le monde a quadruplé en 25 ans. (**Allen et al., 2010**).

Cette mesure est bien sûr biaisée pour plusieurs raisons :

Premièrement, la surveillance des forêts a beaucoup progressé durant cette période, notamment grâce aux satellites. D'autre part, le nombre de pays disposant de moyens importants pour gérer et surveiller les forêts a augmenté.

Deuxièmement, l'expansion et l'explosion démographique ont anthropotisé de vastes étendues jusqu'alors peu ou inhabitées, et de vastes étendus d'exploitations industrielles, objet de toutes les attentions, ont remplacé les forêts naturelles auxquelles on n'attache plus que peu d'importance économique.

# **Chapitre III**

## **La dendrochronologie**

### 3.1. La dendrochronologie

#### 3.1.1. Définition

La dendrochronologie est la science qui étudie les années de croissance des arbres à partir de leur bois. La dendrochronologie peut également être utilisée pour estimer l'âge d'un arbre, pour évaluer la qualité du bois et pour suivre la croissance des arbres dans les forêts gérées (**Tab. 03**).

La dendrochronologie est une technique de mesure physique qui consiste à donner une image du temps à partir de certaines qualités des cernes annuels des arbres. La mesure de ces variations donne donc des séquences graphiques caractéristiques et uniques des cernes des arbres (**Fritts, 1976**).

**Tableau 03.** Disciplines actuelles utilisant la dendrochronologie

Domaine	Discipline	Applications
<b>Écologie</b>	Dendroécologie	Historique des feux, dépérissement des forêts, dynamique et croissance...
<b>Climatologie</b>	Dendroclimatologie	Périodes de froid et de sécheresse, reconstruction du climat passé, analyse du climat présent...
<b>Géologie</b>	Dendrogéomorphologie	Éruptions volcaniques...
<b>Anthropologie</b>	Dendroarchéologie Dendroglaciologie	Datation des constructions anciennes, arbres fossiles, monuments historiques...

#### 3.1.2. Principes

Le principe de la dendrochronologie repose sur le fait que les arbres produisent chaque année un nouveau cerne annuel de bois. Les cernes annuels sont visibles en coupant le tronc d'un arbre dans le sens radial et en observant les couches de bois de l'intérieur vers l'extérieur. Les cernes annuels peuvent être utilisés pour déterminer l'âge d'un arbre et pour étudier les conditions climatiques et environnementales passées.

Les scientifiques peuvent également utiliser les cernes annuels pour suivre la croissance des arbres et pour évaluer l'impact des perturbations environnementales telles que les incendies de forêt ou les maladies des arbres (**Speer, 2010**).

- Agrégation de plusieurs signaux
- Principe fondamental : interdatation
- Quatre principes additionnels
- Standardisation des séries dendrochronologique

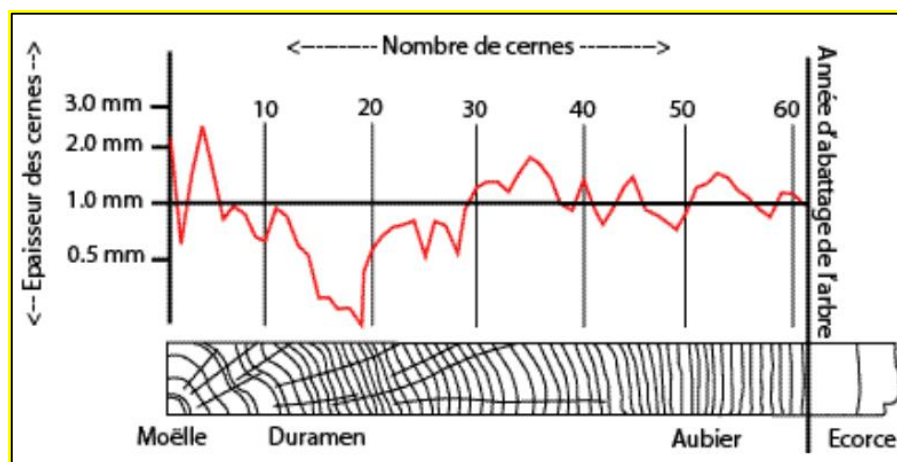
### 3.1.3. Datation d'un arbre

La datation d'un arbre implique de déterminer son âge exact en utilisant les cernes annuels formés dans le bois. La datation d'un arbre implique de déterminer son âge exact en utilisant les cernes annuels formés dans le bois. Pour être précis, la datation d'un arbre doit être effectuée sur un échantillon représentatif de la croissance annuelle de l'arbre. Les scientifiques peuvent utiliser des techniques telles que la dendrochronologie pour éliminer ces influences et obtenir des estimations précises de l'âge d'un arbre (**Grissino-Mayer, 2001**).

Enfin multipliez le diamètre du tronc par le facteur multiplicateur correspondant à votre type d'arbre et vous aurez un âge approximatif de l'arbre.

### 3.1.4. Propriétés recherchées

L'analyse dendrochronologique implique l'étude de la croissance annuelle des arbres à partir de leurs cernes annuels. Les changements de densité dans le bois peuvent être utilisés pour étudier l'influence de ces facteurs sur la croissance des arbres. En résumé, l'analyse dendrochronologique implique l'étude de différentes propriétés de la croissance annuelle des arbres telles que la largeur des cernes annuels, la densité du bois, la structure des cernes annuels et les caractéristiques de la sève. Les scientifiques peuvent utiliser ces propriétés pour déterminer l'âge des arbres, étudier les conditions environnementales et la santé des arbres au fil du temps (**Trouet et al., 2009**).



**Figure 10.** Courbe dendrochronologique (**Julien Quiret** - l'arbre celtique)

Pour qu'un échantillon prélevé sur une partie du tronc de l'arbre soit utilisable en dendrochronologie, il est nécessaire qu'il offre au moins 80 cernes consécutifs (**Lavier et al., 1988**).

### 3.1.5. Echelle et fiabilité

En fait, tous les genres végétaux ne répondent pas de la même façon aux stimuli météorologiques : certains sont plus sensibles que d'autres soit à l'ensoleillement, soit à la dessiccation estivale des sols, soit aux froids tardifs, etc. Aussi, la dendrochronologie établit une échelle séparée pour chaque genre. Et le dendrochronologue en expérimente quotidiennement le degré d'inexactitude.

Dans cette majorité elle-même, il y a un certain flottement de la fidélité d'enregistrement. Ceci engage les dendrochronologues à estimer les ressemblances ou les dissemblances entre séquences chronologiques (**Lambert et al., 1985**).

### 3.2. Applications et méthodes

La dendrochronologie a de nombreuses applications, notamment dans les domaines suivants :

- **Archéologie** : la dendrochronologie peut être utilisée pour dater des bâtiments anciens, des objets en bois,
- **Écologie** : la dendrochronologie peut être utilisée pour étudier les changements climatiques, la croissance des forêts, les effets des perturbations environnementales,
- **Géologie** : la dendrochronologie peut être utilisée pour étudier les éruptions volcaniques, les glissements de terrain, les séismes,
- **Histoire** : la dendrochronologie peut être utilisée pour dater des archives historiques, des événements politiques,
- **Hydrologie** : la dendrochronologie peut être utilisée pour étudier les régimes de pluie et de neige, les niveaux d'eau
- **Météorologie** : la dendrochronologie peut être utilisée pour étudier les tendances climatiques à long terme, les fluctuations saisonnières,
- **Paléoclimatologie** : la dendrochronologie peut être utilisée pour étudier les changements climatiques à long terme, les événements météorologiques extrêmes (**D'Arrigo et al., 2006**).

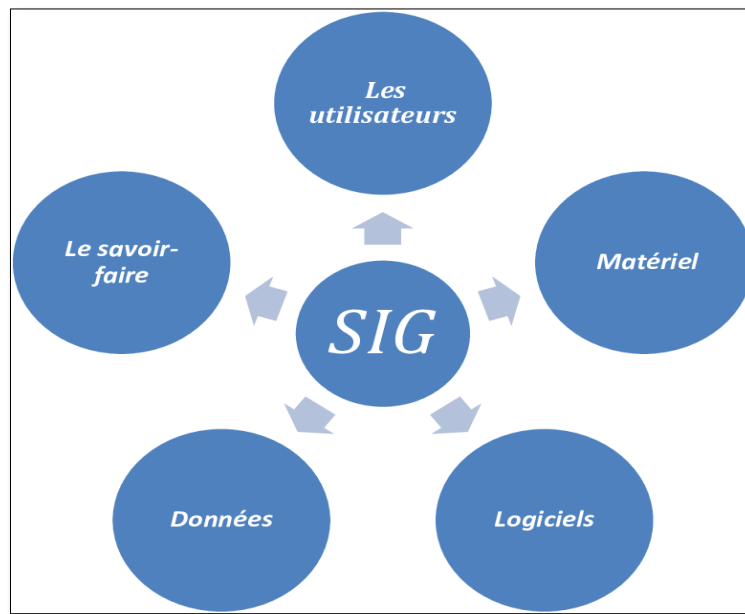
# **Chapitre IV**

## **Les systèmes d'informations géographiques**



Un système d'information géographique (SIG) est un système informatique permettant à partir de diverses sources, de rassembler et organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace.

C'est un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision.



**Figure11.** Schéma des composantes d'un SIG

#### 4.1. Notions des SIG

Les systèmes d'information géographique sont des outils informatiques qui permettent de capturer, stocker, analyser et présenter des données géo spatiales. Les SIG peuvent être utilisés dans de nombreux domaines, notamment la géologie, la géographie, la planification urbaine, la défense et la sécurité, la gestion des ressources naturelles, la santé publique, etc.

**Analyse :** Processus d'identification d'une question ou d'un problème à résoudre, de modélisation de ce problème, de recherche des résultats de modélisation, d'interprétation des résultats, d'élaboration d'une conclusion, assorti éventuellement d'une recommandation.

**Attribut :**

1. information caractéristique d'une entité géographique d'un SIG, généralement stockée dans une table et liée à l'entité par un identifiant unique. Les attributs du lit d'une rivière, par exemple, peuvent être son nom, sa longueur, sa profondeur moyenne, etc.

2. dans les jeux de données raster, information associée à chaque valeur unique des cellules.

3. information cartographique qui définit la manière dont les entités sont affichées et étiquetées sur une carte. Les attributs cartographiques d'un fleuve peuvent être, par exemple, l'épaisseur de ligne, la longueur de ligne, la couleur et la police de caractères.

**Carte (map, web map) :** Représentation graphique, sur une surface plane, des entités physiques d'une partie ou de la totalité de la Terre ou d'autres étendues, à l'aide de formes représentant des objets, des symboles et des étiquettes spécifiant les propriétés ou les descriptions des entités

**Champ :** Colonne d'une table attributaire. Éviter les caractères spéciaux et accentués

**Classe d'entités (Layer) :** Les classes d'entités peuvent être autonomes dans une géodatabase ou faire partie d'un jeu de classes d'entités. Elles permettent de grouper des entités homogènes dans une seule unité à des fins de stock.

**Couche (Feature Layer) :** Dans ArcGIS, référence à une source de données, telle qu'une classe d'entités de géodatabase, un raster, un fichier de formes, etc., qui définit la manière dont les données doivent être symbolisées sur une carte ou dans un document 3D, comme ArcGlobe. Les couches permettent également de définir d'autres propriétés, notamment les entités de la source de données à inclure. Les couches peuvent être stockées dans des documents ArcMap (.mxd) ou enregistrées en tant que fichiers de couches (.lyr).

**Données géographiques :** Informations relatives aux entités réelles, notamment leur forme, leur emplacement et leur description. Les données géographiques sont composées de données spatiales et de données attributaires.

**Données géométriques :** Couple de coordonnées (x, y) ou triplet (x, y, z) d'une entité point, ligne ou polygones.

**Données attributaires :** Ensemble des attributs d'une entité

**Entité linéaire :** dans ArcGIS, représentation numérique d'un lieu ou d'un objet dont la longueur s'affiche, mais qui est trop petite pour s'afficher sous forme de surface polygonale à une échelle particulière, comme une rivière sur une carte mondiale ou une rue sur un plan de ville.

**Entité ponctuelle :** dans le logiciel Esri, représentation numérique d'un lieu ou d'un objet trop petit pour afficher une zone ou une longueur à une échelle donnée comme une ville sur une carte mondiale ou un bâtiment sur un plan de ville.

**Entité surfacique :** Les entités surfaciques possèdent une géométrie de polygone et peuvent se présenter sous une forme en une partie ou multi-parties

**Géodatabase (GDB) :** La géodatabase constitue la structure de données native utilisée dans ArcGIS et le principal format utilisé pour la mise à jour et la gestion des données.

**Raster** : modèle de données spatiales définissant l'espace comme un tableau de cellules de taille égale disposées en lignes et colonnes. Chaque cellule contient une valeur attributaire et des coordonnées de position. Une image utilise une structure de données raster.

**Table** : ensemble d'éléments de données organisés en lignes et colonnes. Chaque ligne représente une entité, ou un enregistrement, tandis que chaque colonne représente un champ ou une valeur attributaire unique. Une table affiche un nombre précis de colonnes, mais peut disposer d'un nombre indéfini de lignes.

**Vecteur** : modèle de données basé sur des coordonnées, représentant des entités géographiques sous forme de points, de lignes et de polygones. Chaque point est représenté sous forme de paire de coordonnées unique, alors que les entités linéaires et surfaciques sont représentées sous forme de listes ordonnées de sommets. Les attributs sont associés à chaque entité.

## 4.2. Apport des SIG dans la gestion forestière

Le terme « gestion forestière » regroupe toutes les formes d'actes, d'interventions et de décisions prises dans un concept général d'amélioration du rendement d'une forêt dans un volet économique, touristique ou encore écologique. Les systèmes d'information géographique (SIG) peuvent être largement utilisés dans le secteur de la foresterie pour améliorer la planification, la gestion et la surveillance des ressources forestières.

Voici quelques exemples d'applications courantes des SIG dans la foresterie

1. **Planification des récoltes** : Les SIG peuvent être utilisés pour planifier les récoltes en fonction de la cartographie des arbres, de la topographie, des zones humides et des zones protégées
2. **Surveillance des incendies de forêt** : Les SIG peuvent aider à surveiller les incendies de forêt en utilisant des images satellites et des données géospatiales pour suivre la progression de l'incendie et déterminer les zones à risque
3. **Évaluation de l'impact environnemental** : Les SIG peuvent être utilisés pour évaluer l'impact environnemental de la foresterie sur les sols, les eaux et la biodiversité en utilisant des données géospatiales pour cartographier les zones touchées et surveiller les changements
4. **Gestion des ressources** : Les SIG peuvent aider à gérer les ressources forestières en fournissant des informations en temps réel sur l'état des forêts et la quantité de bois disponible

- 5. Cartographie des forêts :** Les SIG peuvent être utilisés pour cartographier les forêts et les zones boisées en utilisant des images satellites et des données de terrain pour déterminer les limites des forêts et les caractéristiques des arbres.

Les SIG jouent un rôle important dans l'amélioration de la gestion durable des forêts en permettant une meilleure planification, une meilleure surveillance et une meilleure évaluation de l'impact environnemental.

#### **4.3. Les SIG et le dépérissement des forêts**

Le dépérissement des forêts peut être étudié et surveillé à l'aide de systèmes d'information géographique (SIG). Les SIG peuvent fournir des informations géo spatiales précises sur l'état des forêts, ce qui peut aider à détecter et à surveiller le dépérissement des forêts. Les SIG peuvent également être utilisés pour cartographier les causes du dépérissement, telles que la dégradation des sols, la pollution de l'air et de l'eau, la coupe illégale et les incendies de forêt.

Les SIG peuvent aider à surveiller le dépérissement des forêts en utilisant des images satellites pour suivre les changements dans la couverture forestière, la densité des arbres et la biomasse. Les SIG peuvent également être utilisés pour surveiller la santé des arbres en utilisant des données de terrain pour déterminer les causes du dépérissement, telles que les maladies des arbres et les infestations d'insectes

Les SIG peuvent également être utilisés pour évaluer l'impact du dépérissement sur l'environnement et les communautés locales en utilisant des données géo spatiales pour cartographier les zones touchées et surveiller les changements. Cela peut aider à prendre des mesures pour ralentir ou inverser le dépérissement et à protéger les ressources forestières pour les générations futures

Les SIG sont un outil important pour comprendre et surveiller le dépérissement des forêts et pour aider à protéger les forêts pour les générations futures. Les SIG peuvent aider à prendre des décisions éclairées pour protéger les forêts et les ressources forestières, en utilisant des données précises et actualisées sur l'état des forêts.

Une approche générale pour l'application des systèmes d'information géographique (SIG) pour surveiller et étudier le dépérissement des forêts :

**Collecte de données :** La première étape consiste à collecter des données géo spatiales sur l'état des forêts, telles que les images satellites, les données de terrain et les données environnementales.

**Analyse de données :** Les données collectées sont ensuite analysées pour déterminer l'étendue et la gravité du dépérissement des forêts. Les SIG peuvent être utilisés pour cartographier les zones touchées et surveiller les changements dans la couverture forestière, la densité des arbres et la biomasse.

**Évaluation des causes :** Les causes du dépérissement des forêts, telles que les maladies des arbres, les incendies de forêt, les coupes illégales, la dégradation des sols et la pollution de l'air et de l'eau, peuvent être identifiées en utilisant des SIG pour analyser les données géo spatiales.

**Surveillance :** Les SIG peuvent être utilisés pour surveiller continuellement le dépérissement des forêts en utilisant des images satellites régulières pour suivre les changements dans l'état des forêts. Cela peut aider à détecter rapidement les changements et à évaluer l'impact sur l'environnement et les communautés locales

**Élaboration de solutions :** Les SIG peuvent être utilisés pour élaborer des solutions pour ralentir ou inverser le dépérissement des forêts. Les informations géo spatiales peuvent être utilisées pour identifier les zones les plus touchées et les zones qui ont besoin d'interventions prioritaires.

**Évaluation des résultats :** Les SIG peuvent être utilisés pour évaluer les résultats des mesures prises pour inverser le dépérissement des forêts. Les données géo spatiales peuvent être utilisées pour suivre les changements dans l'état des forêts et évaluer l'efficacité des interventions.

Les SIG de manière efficace pour surveiller et étudier le dépérissement des forêts, il est possible d'obtenir des informations précises et actualisées pour prendre des décisions éclairées pour protéger les forêts et les ressources forestières pour les générations futures.

## **PARTIE II**

# **APPROCHE EXPERIMENTALE**

# **Chapitre V**

## **Matériels et Méthodes**

### 5.1. Présentation du massif de l'Ouarsenis

L'Ouarsenis est un massif de l'Atlas tellien, situé dans le Nord de l'Algérie. Il s'étend entre le Chelif à l'Est et au Nord, l'Oued Mina et les monts de Saïda à l'Ouest et le plateau du Sersou au Sud, à cheval sur les wilayas de Médéa, Ain Defla, Tissemsilt, Chlef, Relizane et Tiaret. Il s'étire sur environ 200 km d'Ouest en Est, tandis que sa largeur est de l'ordre de 100 km sauf à l'Est, où elle ne dépasse pas 60 km (**Mattauer, 1958 ; Sari, 1977 & Sarmoum, 2016**) (**Fig. 13**).

Les principaux sommets sont le mont Achaoun (1 850 m) le Ras Elbrarit (1 750 m), le pic Sidi Abdelkader, le mont Tamedrara, le Kef Siga et le Kef Sidi Amar (1 985 m, au nord de Bordj Bou Naama), le point culminant du massif.

La région offre globalement de bonnes conditions climatiques, à l'exception de la zone culminante qui se caractérise par de longs et rigoureux hivers. Les effets des irrégularités pluviométriques et thermiques sont ici atténués. Le massif échappe aux influences du sud, même s'il est en contact direct avec le domaine semi-aride.

La montagne est un refuge pour la flore et la faune, on y trouve notamment de vastes forêts de cèdres, de pins d'Alep et de chênes verts, mais elle favorise aussi l'agriculture, notamment sur les versants et le plateau du Sersou couvert de cultures céréalières. Le parc national de Theniet El-Had s'étend sur 3 616 hectares, il a été créé dans la partie orientale du massif pour protéger des forêts de cèdres séculaires.





Sommet de l'Ouarsenis  
versant Sud près de  
Tamalehat



Sommet enneigé du mont  
Ouarsenis surplombant Boucaïd



Cédraie



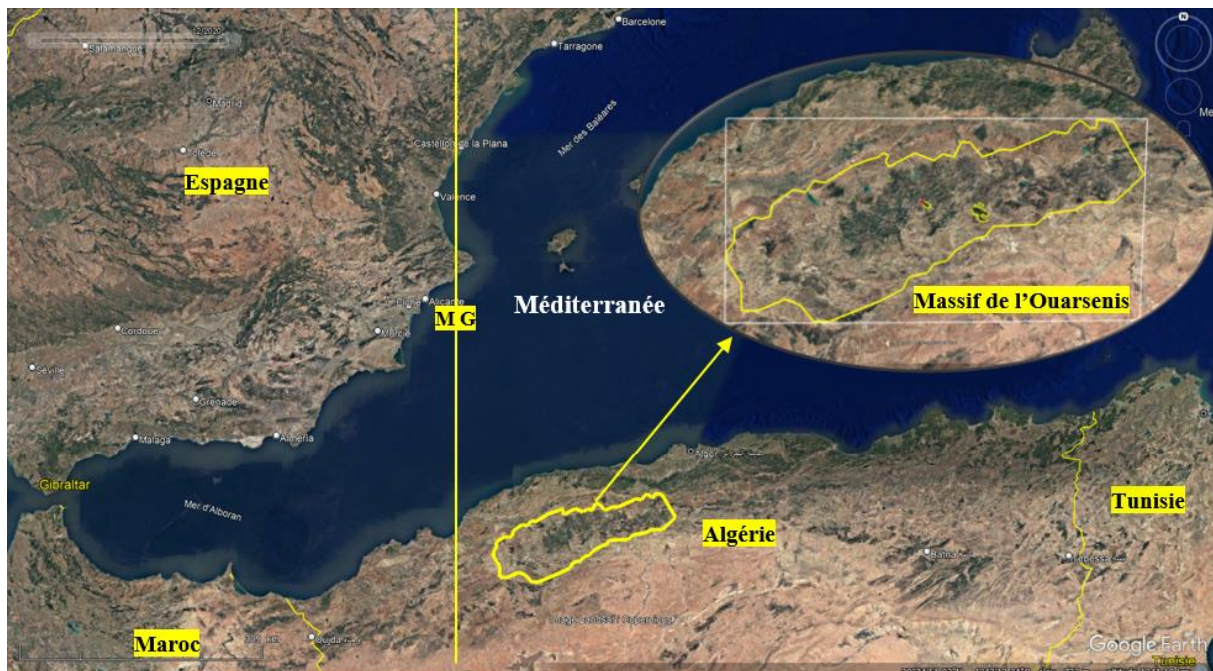
Forêt et agriculture



Rigueur du climat en altitude

**Figure 12.** Quelques paysages du massif de l'Ouarsenis

### 5.1.1. Situation géographique de la zone d'étude



**Figure 13.** Situation et limite géographique du massif de l'Ouarsenis

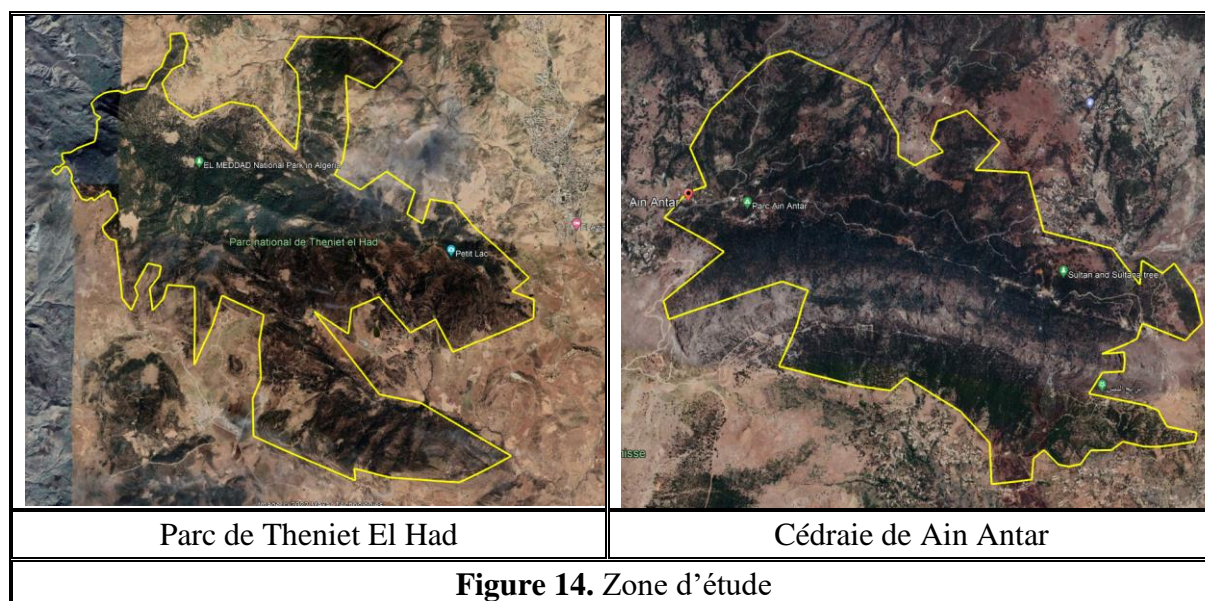
### 5.1.2. Délimitation de la zone d'étude

Le massif de l'Ouarsenis est limité entre les latitudes 35°33' et 36°15' Nord et les longitudes 00°35' et 02°40' Est avec une variabilité latitudinale très marquée. En matière d'étages bioclimatiques et d'unités morphologiques, il peut être divisé en 12 zones avec des superficies respectives selon son appartenance aux différentes wilayas (Tab. 02).

**Tableau 04.** Zonage du massif de l'Ouarsenis

Zonage	Superficie (ha)	
	Zone	Wilaya
Ouarsenis Semi-Aride Médéa	44 428	<b>88 222</b>
Ouarsenis Subhumide Médéa Sud	20 404	
Piémont Sud Ouarsenis Médéa	23 390	
Piémonts Nord Ouarsenis Ain Defla	29 839	<b>191 639</b>
Montagne Ouarsenis Ain Defla	161 800	
Piémont Ouest Ouarsenis Relizane	184 102	<b>244 749</b>
Montagne Ouarsenis Relizane	60 647	
Mont de Tiaret	177 720	<b>177 720</b>
Piémonts Ouarsenis Semi-aride Chlef	31 894	<b>90 721</b>
Piémonts Nord-Ouest Ouarsenis Chlef	58 827	
Piémont Sud Montagne Ouarsenis Tissemsilt	102 169	<b>247 489</b>
Montagne Ouarsenis Tissemsilt	145 320	
<b>Total</b>	<b>1 040 540</b>	<b>1 040 540</b>

L'étude a été réalisée dans le parc de Theniet El Had et la cédraie de Ain Antar (Fig. 14)



### 5.1.3. Milieu physique

#### 5.1.3.1. Relief

Cet ensemble montagneux très compact est marqué par un relief accidenté et entaillé transversalement par les affluents du Cheliff. Il est limité au Nord par la vallée du Cheliff et au Sud par des hautes plaines steppiques de la vallée de Nahr Ouassel. D'ouest en est, il est situé entre les monts des Béni Chougrane et les monts du Titteri (**DGF, 2002**).

L'Ouarsenis comprend un gigantesque pivot en forme de cône surbaissé à flancs escarpés, il s'agit du pic de Sidi Amar, le plus haut sommet de l'Ouarsenis avec une altitude de 1985m. Au Nord-Est, se localise Draa Sidi Abdelkader une importante muraille calcaire, une sorte de sierra courbée en un grand arc concave vers découpée en dents de scie comme une gigantesque lame (**Sari, 1977**).

Noms de saints aux principaux sommets, les visites rituelles et repas communiels qui y ont lieu chaque année témoignent du rôle qu'ont joué de tout temps les sanctuaires de sommet dans la vie religieuse de la région (**Sari, 1977**). Relief accidenté avec de fortes pentes supérieures à 25 % sur 38 % du massif. La classe de pente comprise entre 12.5 à 25 % représente 41 % du territoire. Les altitudes supérieures à 800 m sur 31 % du massif.



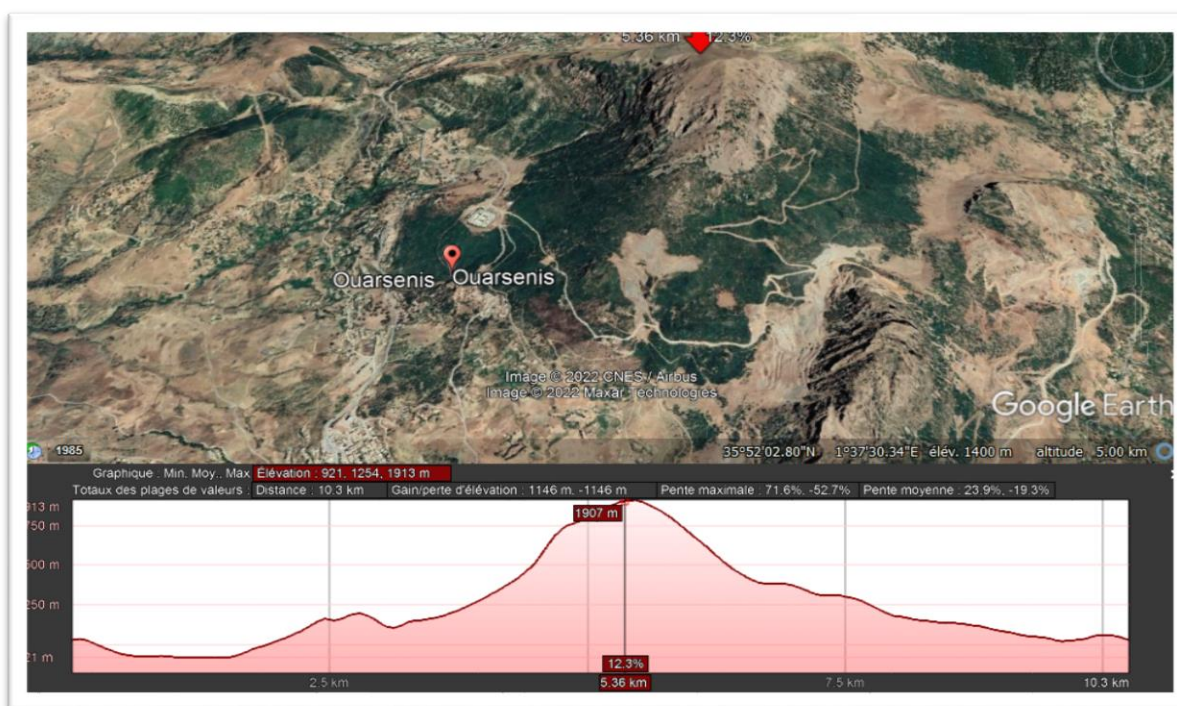
**Figure 15.** Carte des reliefs du massif de l'Ouarsenis transect Ouest-Est

### 5.1.3.2. Orographie

C'est un important chaînon montagneux dans l'Atlas tellien qui se caractérise par une zone orographique remarquable, où se concentrent des montagnes calcaires culminantes et différentes les unes des autres aussi bien par leurs dimensions que par leurs formes et l'allure de leurs couches (**Belmedjahed, 2014**).

Le massif de l'Ouarsenis est limité au Nord par la plaine du Chélif, à l'Ouest par la vallée et la plaine de la Mina, au Sud par le cours de la Mina et les plateaux de la région de Tiaret. A l'Est, il n'y a aucune limite orographique naturelle (**Bernard et Ficheur, 1902**).

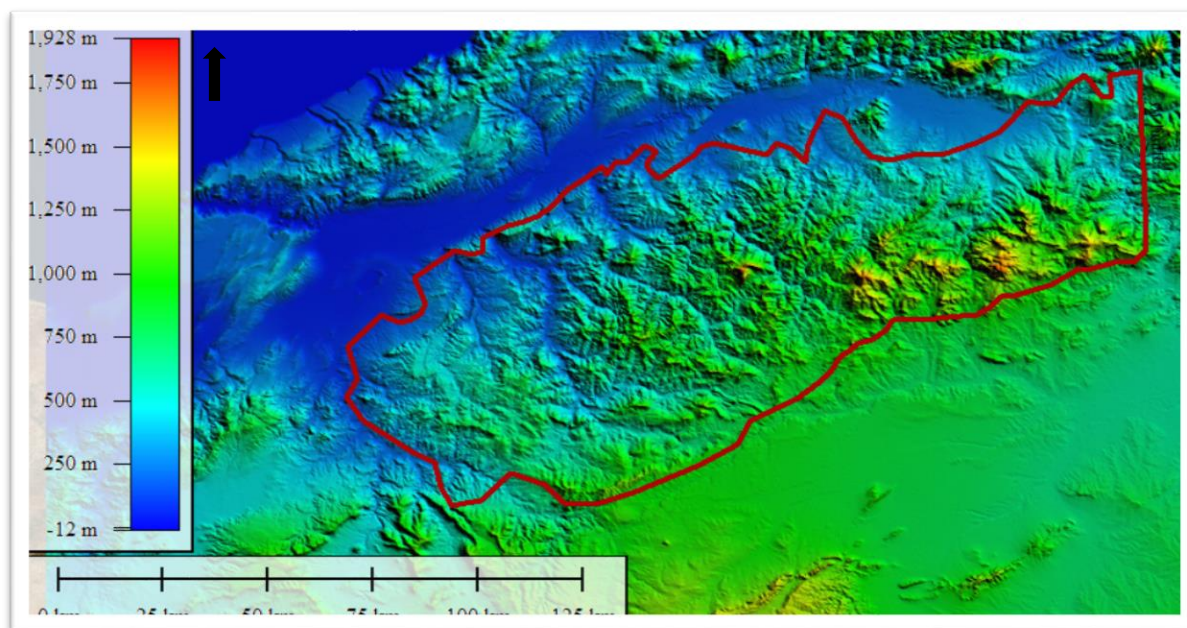
Le Grand pic occupe la partie centrale du massif et constitue le relief le plus important avec une altitude de 1985 m ce qui en fait le plus haut massif de l'ouest Algérien.



**Figure 16.** L'orographie du massif de l'Ouarsenis

### 5.1.3.3. La pente

Les terres à pentes modérées inférieures à 12,5 % favorables à l'agriculture ne représentent que 20 % de la zone et 56 % des terrains se situent sur des altitudes inférieures à 800 m. La zone Est et centrale du massif de l'Ouarsenis comprend des pentes abrupte (supérieur à 12 %) devenant de plus en plus faible dans les zones occidentales et méridionales (3 à 12 %), une conception favorisant l'action de glissement des sols. Les terrains à faible pente sont rarement (0-3 %) rencontrés le long du massif (**fig.17**) (**Sari, 1977 et Anonyme, 2001**).



**Figure 17.** MNT du massif de l'Ouarsenis

#### 5.1.3.4. Hydrogéologie

Le massif est formé de plissements de schistes, flysch et marnes entassés que dominent quelques vigoureux appointements de calcaire infra-crétacés et jurassiques basculés, notamment le grand dôme calcaire du Kef Sidi Amar, près de Bordj Bou Naama. Le massif, contourné à l'ouest par l'oued Mina, est compartimenté par des affluents du Chéelif, qui se dirigent globalement vers le nord/nord-ouest notamment, d'ouest en est, l'oued Rhiou, l'oued Sly, l'oued Fodda, l'oued Zeddine et l'oued Deurdeuss.

À l'exception de la zone culminante qui se caractérise par de longs et rigoureux hivers, la région offre dans l'ensemble de bonnes conditions climatiques. La plupart des terroirs renferme des sols épais et équilibrés, favorables aux cultures et au couvert forestier. Les précipitations largement suffisantes expliquent l'importance des débits d'oueds et le nombre des sources. L'Ouarsenis par sa formation calcaire, est un réservoir d'eau. Cette formation autorise l'infiltration de l'eau (**Belmedjahed, 2014**).

#### 5.1.3.5. Paramètres climatiques

##### A. Pluviométrie

Quoique l'Ouarsenis est une partie prenante du pourtour méditerranéen, son climat est plutôt semi-aride caractérisé par une irrégularité des précipitations. Ces dernières décennies, l'Ouarsenis est soumis à des épisodes secs clairement prolongés infectant clairement la quantité

des eaux circulant dans ces rivières. D'ailleurs, jadis, la neige reste le long de l'année sur les sommets de l'Ouarsenis et alimente les rivières qui traverses le massif de l'amont vers l'aval.

Or que ce n'est plus le cas. Il s'agit d'une modification globale du climat avec un déplacement des zones climatiques où l'Ouarsenis ne fait pas l'exception (GIEC, 2007). D'ailleurs, la vulnérabilité du climat méditerranéen a incité de nombreux chercheurs à caractériser le changement climatique et la variabilité des précipitations dans le nord d'Afrique (Medjerab, 2005 ; Meddi, 2009 ; Sebbar et al., 2012).

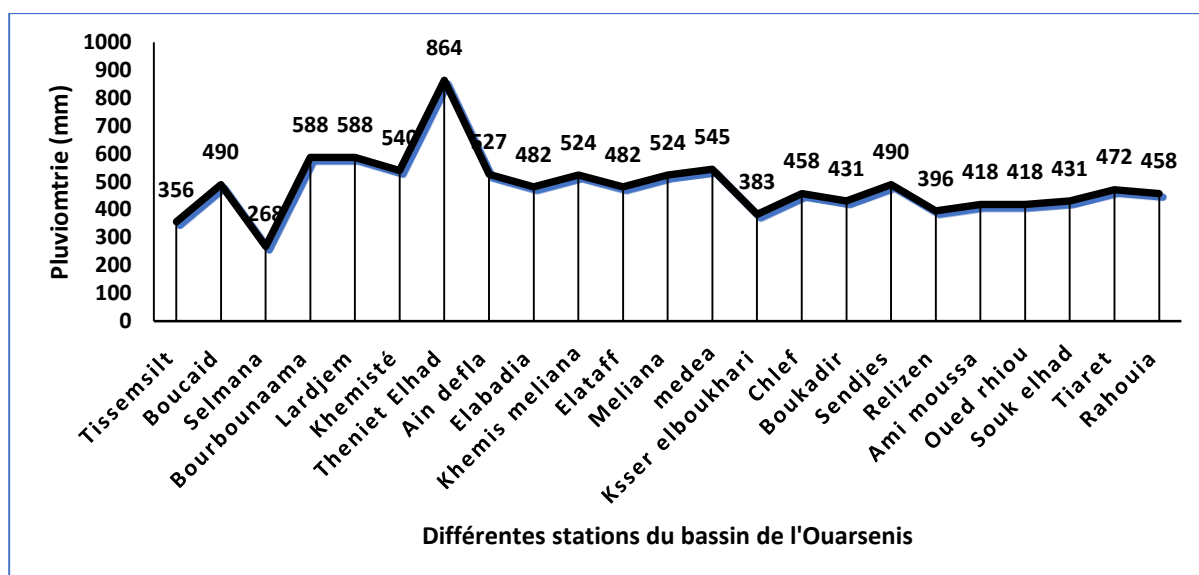
80 % du territoire reçoit une pluviométrie appréciable de 400 à 700 mm / an. L'étage bioclimatique subhumide couvre 33 % du territoire du massif et l'étage bioclimatique semi-aride s'étend sur 62 % du massif.

Le climat se traduit généralement par le rapport température précipitation, ils représentent, ensemble, un facteur incontournable du fait qu'ils caractérisent la nature du couvert végétale d'une région à l'autre selon leur ampleur.

Néanmoins, dans la région de l'Ouarsenis, d'autres facteurs tel que les vents et les neiges jouent un rôle non négligeable dans le climat de se massif.

Les précipitations annuelles varient entre 400 et 600mm/an le long du massif de l'Ouarsenis, excédant 800mm/an dans les hautes altitudes. D'ailleurs, la région centrale du massif enregistre des précipitations d'environ 766mm/an à kef sidi Abdelkader et 864mm/an à Djbel el Meddad.

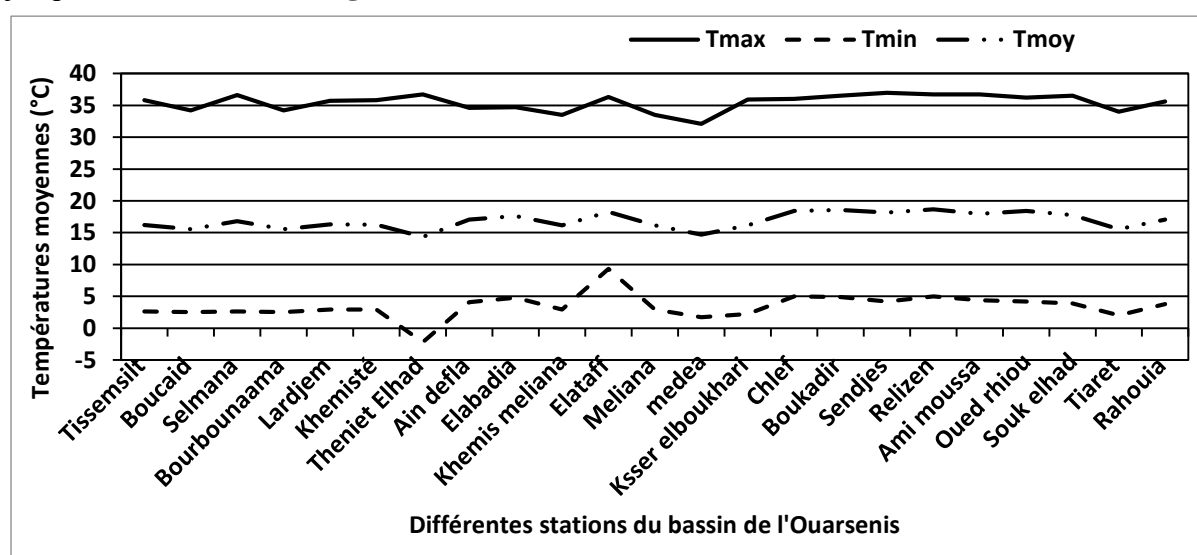
La **figure 18** montre que les précipitations sont abondantes durant le mois de janvier à Theniet el Had, el Nouadeur, Sidi Abdelkader et la partie sud de Tiaret, durant le mois de novembre à Ammi Moussa, Sidi Abdelkader et la partie nord de Tiaret, et durant le mois de décembre à Boughar et Chelef. Les précipitations minimales sont enregistrées durant les mois de Juillet et Août.



**Figure 18.** Précipitations annuelles moyennes des stations du massif de l'Ouarsenis (91 à 21)

## B. Températures

Dans l'ensemble des stations, les températures minimales mensuelles (m) sont enregistrées durant le mois de janvier, elles varient d'une station à l'autre elle est de l'ordre de  $-2,2^{\circ}\text{C}$  à Djebel El Meddad,  $3,2^{\circ}\text{C}$  à El Nouadeur,  $2^{\circ}\text{C}$  à Tiaret et  $05^{\circ}\text{C}$  à Chlef. Les températures maximales (M) du massif sont enregistrées durant les mois de Juillet et Août, elles varient entre  $27,9^{\circ}\text{C}$  et  $36,7^{\circ}\text{C}$  de Djebel El Meddad jusqu'à Ammi Moussa. Les températures moyennes annuelles oscillent entre  $10,32^{\circ}\text{C}$  et  $17,95^{\circ}\text{C}$  de Djebel El Meddad jusqu'à Ammi Moussa (**Fig. 19**).



**Figure 19.** Températures moyennes annuelles des stations du massif de l'Ouersnis (91 à 21)

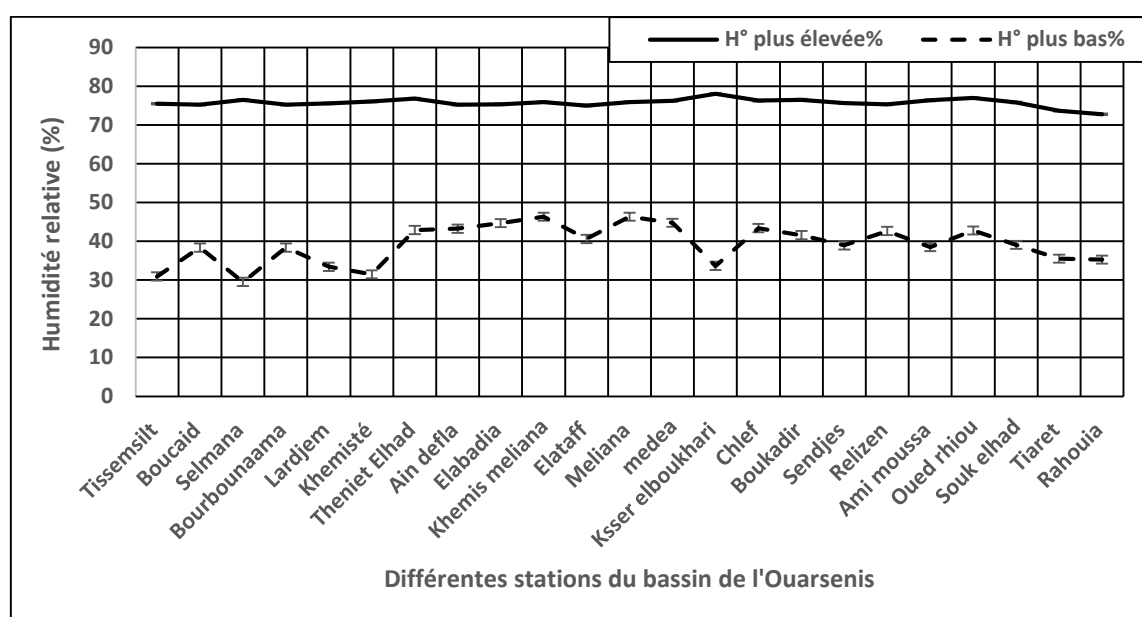
La figure 19 présente la variabilité et les écarts thermiques des températures moyennes mensuelles et annuelles du massif.

### C. Neige

Elle représentait l'une des principales ressources hydriques pour le massif du fait que la neige tombée en hiver sur les sommets alimente le long de l'année les rivières du massif (**Sari, 1977**). Malheureusement, la situation a changé depuis environ 30 ans où la neige ne peut plus résister à la saison estivale.

### D. Humidité relative

L'humidité représente la charge de l'air en eau. Le massif de l'Ouarsenis couvre une superficie très importante où il en résulte une grande variabilité de l'humidité, la **figure 20** présente la variabilité et les écarts de l'humidité annuelles du massif.



**Figure 20.** Variabilité de l'humidité à travers les stations du massif de l'Ouarsenis

### E. Vent

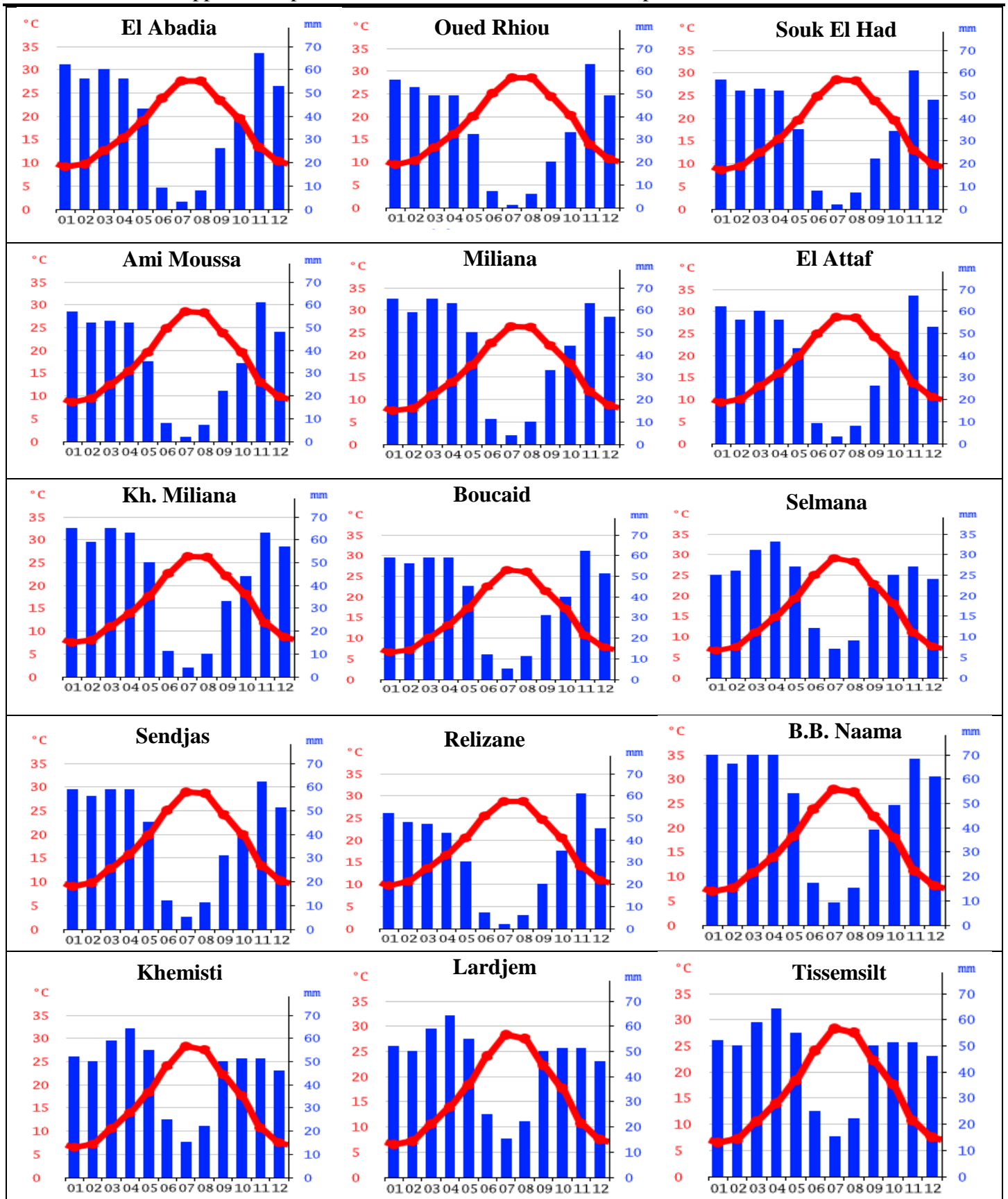
Les vents dominants dans le massif sont ceux venus du Nord-Ouest après avoir perdu la quasi-totalité du taux d'humidité sur l'Atlas tellien. Ainsi que le sirocco caractérisé par sa sécheresse et ses températures élevées. Cette action des vents fait en sorte que le massif est soumis à une forte sécheresse dans la période estivale (**Côte, 1974 et Bensaid, 2003**).

#### 5.1.3.6. Synthèse climatique

##### A. Diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gaussen

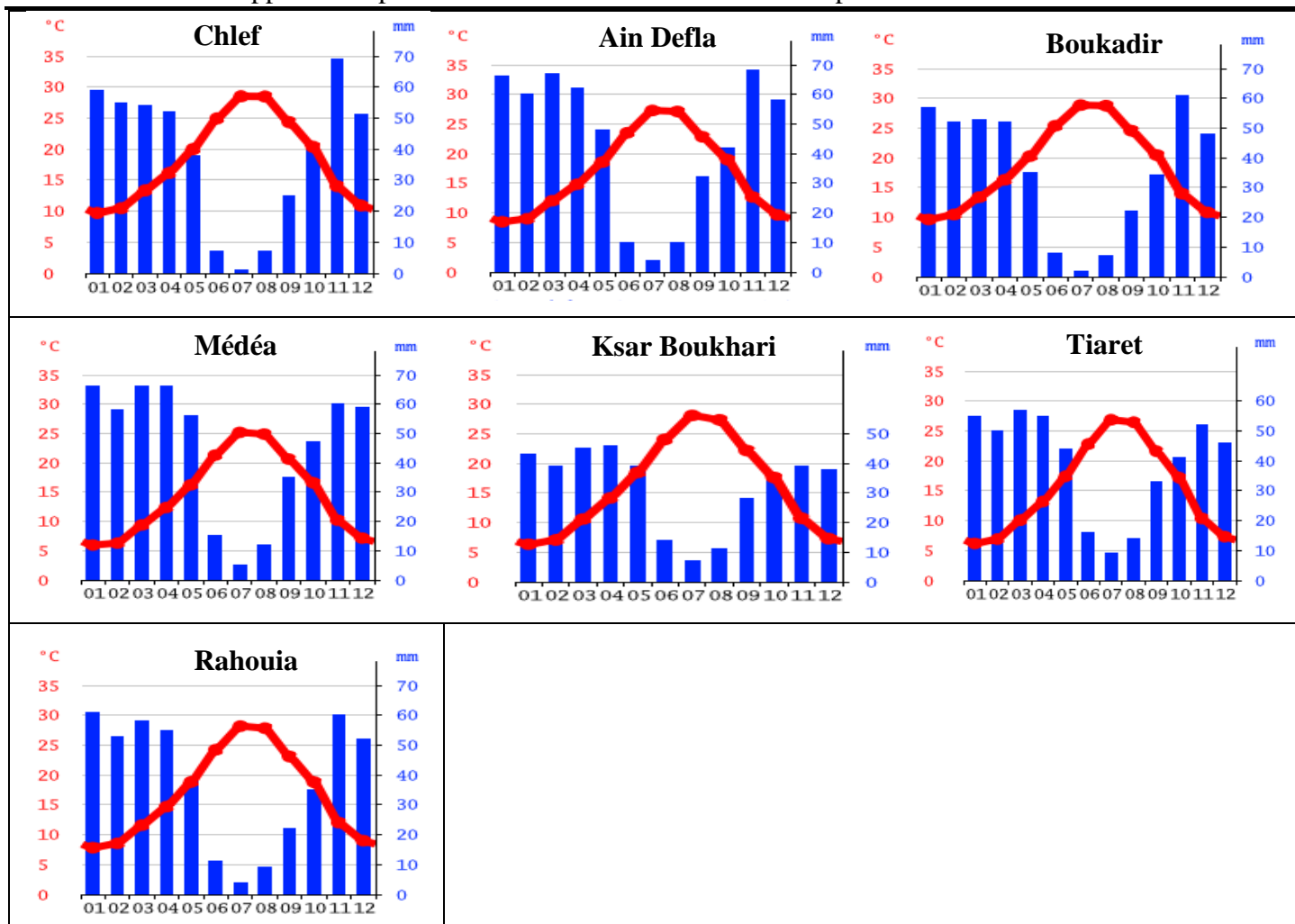
C'est une représentation graphique à double axes où figurent les précipitations moyennes mensuelles (P) sur un axe et les températures moyennes mensuelles (T) sur le deuxième selon le rapport  $P = 2T$ . Il permet de déterminer la durée et la situation durant l'année de la période sèche.





**Figure 21.** Diagrammes ombrothermiques des différentes stations météorologiques

(Précipitations et températures mensuelles moyennes : 1991 à 2021)



**Figure 21. (suite et fin).** Diagrammes ombrothermiques des différentes stations météorologiques (Précipitations et températures mensuelles moyennes : 1991 à 2021)

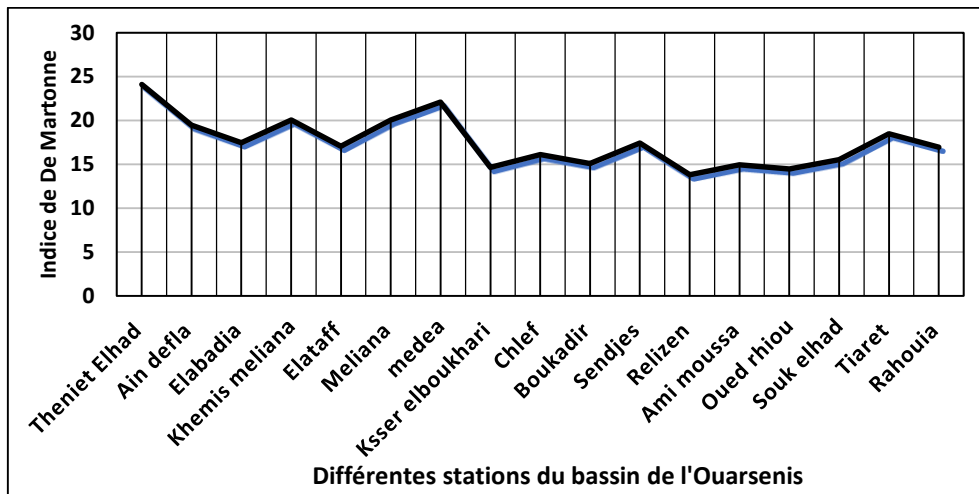
## B. Indice d'aridité de De Martonne

L'aridité est une notion qui définit un déficit de précipitation dans une zone, généralement les zones aride et semi-aride représentent une précipitation annuelle inférieure à 500 mm/an. Quoique les précipitations soient les facteurs primordiaux dans le zonage climatique, néanmoins, d'autres facteurs climatiques s'intègrent d'un moindre degré dans le climat d'une région tel qu'une forte insolation, une faible humidité de l'aire et une évapotranspiration intense

Afin de pouvoir identifier la rugosité d'un climat, plusieurs indices sont mise en place à travers lesquels les chercheurs peuvent connaître d'une façon plus précise l'évolution du climat aride. Parmi ceux on cite

C'est un indice basé sur les précipitations (P) et les températures moyennes annuelles (T) permettant de définir le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température. Sa simplicité lui permet d'être utilisé d'une façon abondante (**figure 38**).

De Martonne a proposé 6 étages climatiques, soient ceux alloués dans le **tableau 03**



**Figure 22.** Indice de Martonne des stations du massif de l'Ouersnis (1991/2021)

**Tableau 05.** Les six étages climatiques selon Martonne

Valeur De I Type De	Type De Climat	Végétation Potentielle
0 à 5	Hyper aride	Désert absolu
5 à 10	Aride	Désert
10 à 20	Semi-aride	Steppe
20 à 30	Semi Humide	Prairie naturelle, forêt
30 à 40	Humide	Forêt
40 à 55	Humide	Forêt

$$\text{Indice annuel : } I = P / (T+10)$$

Selon les résultats obtenus par l'indice de De Martonne de la zone d'étude engendre un climat semi-aride à semi humide.

Nous observons de deux indices différents entre 10 à Selmana et 23.65 à Thenie El Had.

**Tableau 06.** Les étages climatiques de massif d'Ouarsenis selon l'indice de Martonne

Valeur I	Station	Etage Climatique	Végétation Potentielle
5 à 10	Selmana,	Aride	Désert et steppe ; aucune culture sans irrigation
10 à 20	Tissemsilt, Selmana, Ain defla, Elabadia, Elataff, Ksser elboukhari, Chlef, Boukadir, Sendjes, Relizen, Ami moussa, Oued rhiou, Souk Elhad, Tiaret, Rahouia	Semi-aride	Formations herbacées, steppes ou savanes. Irrigation nécessaire pour les cultures Exigeant de l'humidité
20 à 30	Boucaid, Bourbounaama, Lardjem, Khemisté, Theniet Elhad Khemis meliana, Meliana, medea	Semi humide	Prairie naturelle, forêt Naturelle ; irrigation généralement non nécessaire.

### C. Indice de sécheresse estivale de Giacobbe

C'est une formule simple qui caractérise la sécheresse estivale en faisant le rapport des pluies estivales PE sur la moyenne des maximas du mois le plus chaud. En région méditerranéenne, on considère que l'été est sec quand le rapport est < 7.

### D. Quotient pluviothermique d'Emberger

Le climagramme d'EMBERGER permet le zonage en étages bioclimatiques des différents espaces en se basant sur trois paramètres fondamentaux soit ceux

1. Les précipitations annuelles P (mm).
2. La température maximale du mois le plus chaud « M » en (Kelvin).
3. La température minimale du mois le plus froid « m » en (Kelvin).

Selon la formule suivante :

$$Q = 2000P / (M^2 - m^2)$$

La figure 23 présente les résultats obtenus pour le massif de l'ouersnis.

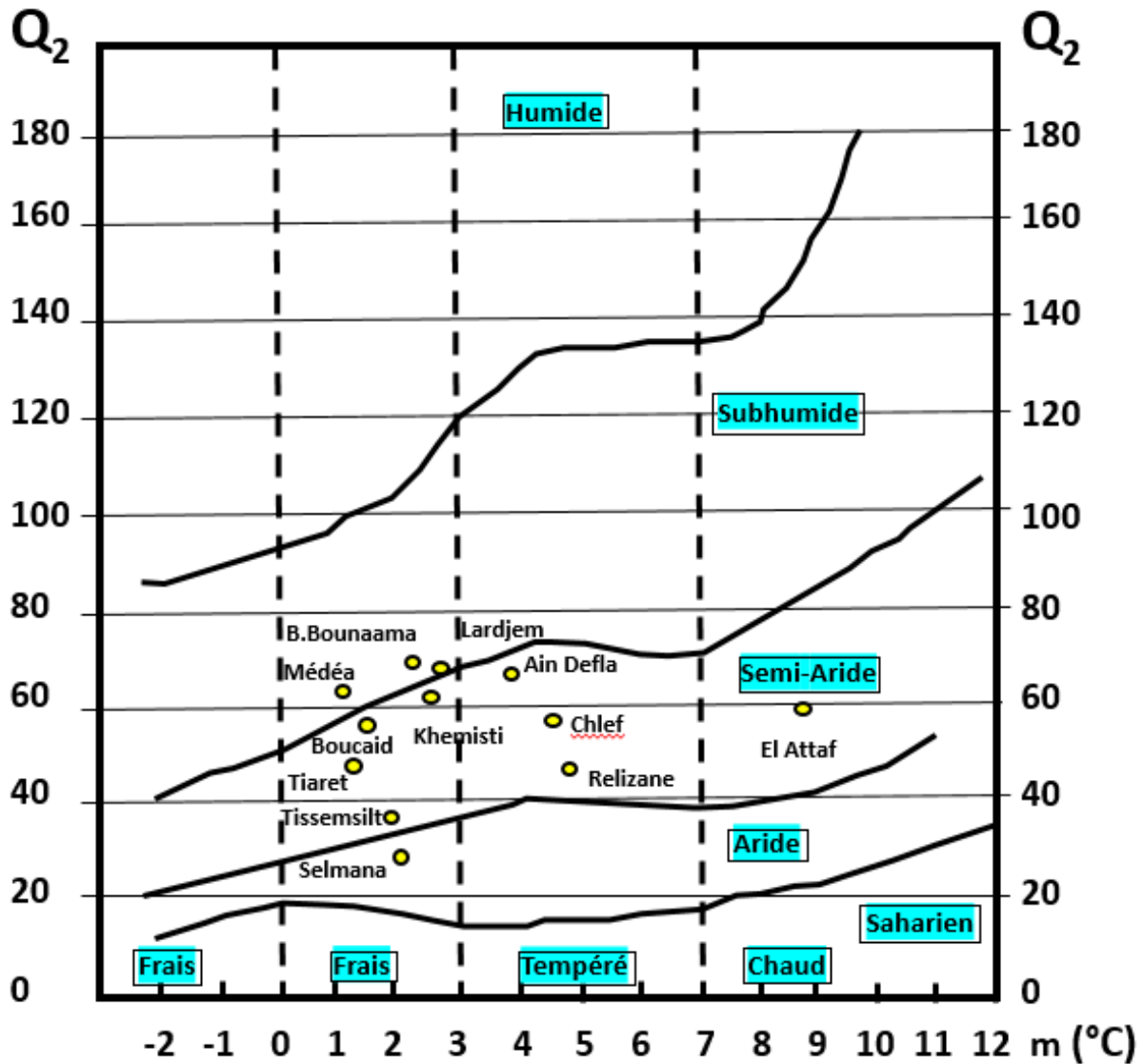


Figure 23. Etages bioclimatiques d'Emberger et positions des stations de l'Ouarsenis

### E. Indice de sécheresse de Birot

Comme pour les deux indices d'Emberger et de Giacobbe, Birot caractérise la sécheresse estivale en région méditerranéenne et considère le rapport

$$I = P \cdot J / T$$

**J** représente le nombre de jours de pluie où Birot énonce les définitions suivantes :

- Tout mois dont l'indice est inférieur à 10 est considéré comme aride.
- L'indice d'aridité estivale  $E$  est la somme de toutes les différences  $(10 - I_m)$  pour tous les mois où  $i$  est inférieur à 10.
- La végétation méditerranéenne est possible quand une région a au moins un mois dont l'indice est inférieur à 10.

## F. Synthèse de la définition des mois secs

La présentation de l'ensemble de ces indices montre que la définition de l'aridité varie selon les auteurs ainsi que les valeurs seuils des combinaisons P et T. Le tableau ci-dessous récapitule celles-ci :

**P** et **T** sont les précipitations et les températures du mois considéré.

**J** est le nombre de jours de pluie.

**Tableau 07.** Classification des mois d'après Birot

Auteurs	Un mois est sec si
Andrews et Mazé (Formule de Martonne)	$P / (T+10) < 1$
Scaetta (Formule de De Martonne)	$P / (T+10) < 1.66$
Gausсен	$P < 10$
Moral	$0.1T^2 - T + 20 > P \text{ } ^3 0.05T^2 - T+10$
<b>Birot</b>	$P < 4T$
<b>Birot</b>	$PJ / T < 10$

### 5.1.3.7. Pédologie

Par sa situation géographique, il constitue un point de liaison entre le littoral et les hauts plateaux. Il représente une richesse biodiversitaire hautement appréciable se manifestant sous une mosaïque de paysages forestiers, préforestiers et présteppiques (**Gsell, 1913 ; Boudy, 1955 & Sari, 1977**). La présence et les pratiques de l'homme jumelée à des périodes climatiques défavorable ont engendré une perte très significative du couvert forestier introduisant, ainsi, la dégradation des sols, par le phénomène de l'érosion hydrique (**Sari, 1977**).

Les sols de l'Ouarsenis peuvent être classés en deux types principaux : les sols argileux et les sols sablo-argileux. Les sols argileux sont généralement profonds et riches en nutriments, mais peuvent être très compacts et difficiles à travailler. Les sols sablo-argileux sont plus légers et plus faciles à travailler, mais ont tendance à être moins fertiles que les sols argileux

Les sols de l'Ouarsenis présentent un caractère alcalin à base de calcaire avec une faible teneur en matière organique. Les sols acides sont souvent présents sous le couvert forestier (**Sari, 1977 ; Anonyme, 1984 ; ANB, 2004**).

Sur le plan physique, l'Ouarsenis repose sur un sol en quasi-totalité argileux développés sur les substrats argilo-marneux, calcaire et le plus souvent schisteux.

Du point de vue physique, on note un peu partout une forte teneur en argile car les sols se sont développés sur les substrats argilo-marneux, calcaire ou surtout schisteux (**Sari, 1977**).

**Sari, 1977** a estimé que l'Ouarsenis comprend cinq types de sols :

- **Sols peu évolués** (sols alluviaux et colluviaux) des textures limono-sableuse ou sablo-limoneuse. Ces sols possèdent de bonnes propriétés physiques (sols légers et bien drainés), mais ils sont pauvres en matières nutritives.
- **Sols calciques** possèdent une texture légère avec une bonne perméabilité et une faible capacité de rétention d'eau.
- **Sols calcaires** couvrent une grande partie du massif. Ces des sols peu différenciés à pH neutre. On peut distinguer du sommet vers le bas, les sols bruns sous couvert forestier, des rendzines initiales (lithosol) et des rendzines sur les colluvium de bas de pente.
- **Sols brunifiés** se trouvent généralement au-dessus de 1400m,
- **Vertisols** à texture fine à dominance d'argiles gonflantes sont des sols qui se signalent par leur teinte noirâtre et leur imperméabilité. Ils se localisent sur les replats, sur les collines du versant septentrional et surtout sur le piémont méridional. Ce sont des terres lourdes, imperméables et compactes, constituent par des argiles gonflantes à pH peu différent de 8.

#### **5.1.3.8. Occupation du sol**

##### **A. Répartition des surfaces**

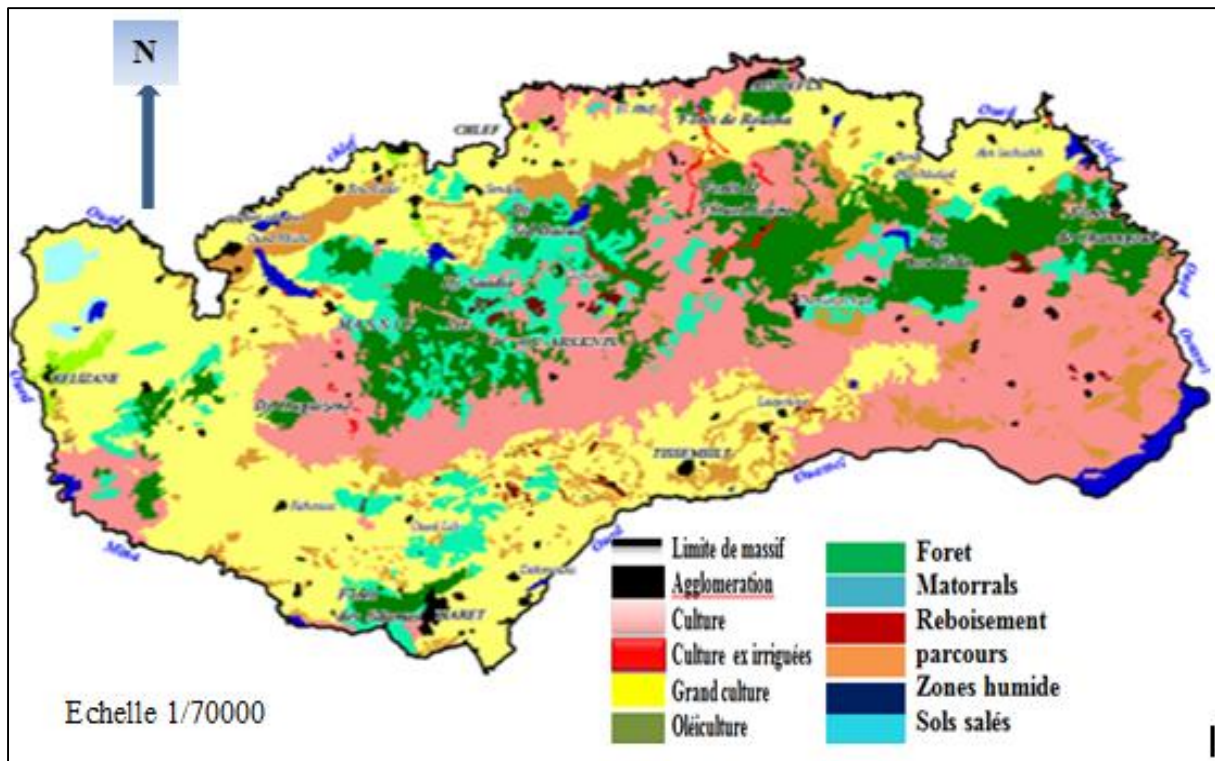
L'Ouarsenis est en quasi-totalité un territoire montagnard à vocation agro-sylvo-pastorale (**Sari, 1977**). Il renferme une importante surface boisée (32% de la surface du massif) occupant la partie centrale et orientale, quoiqu'appréciable, mais qui reste insuffisante car le couvert végétal forestier est dégradé et clairsemé (Fig.16) et soumise à une dégradation inquiétante à cause des activités humaines et le changement du climat.

33% du massif renferment les grandes cultures au piémont du massif et 26% sont des parcours s'étalant sur la partie méridionale (**BNEDER, 2009**)

Terres agricoles sur 58 % de la surface de la zone, mais il s'agit de cultures marginales sur fortes pentes dont 70 % des cultures se situent sur des pentes supérieures à 12.5 % à substrats instables, ce qui a pour résultat l'extension de l'érosion et de l'instabilité des terres avec 80 % du couvert végétal clairsemé et dégradé.

## B. Cartographie de l'occupation du sol

La cartographie de l'occupation du sol peut aider à comprendre les tendances historiques et actuelles de la répartition des différents types de surfaces dans l'Ouarsenis, ainsi qu'à évaluer les impacts potentiels sur l'environnement et la vie locale.



**Figure 24.** Carte d'occupation du sol du massif de l'Ouarsenis (MATE, 2008 modifiée)

## 5.2. Protocole expérimental

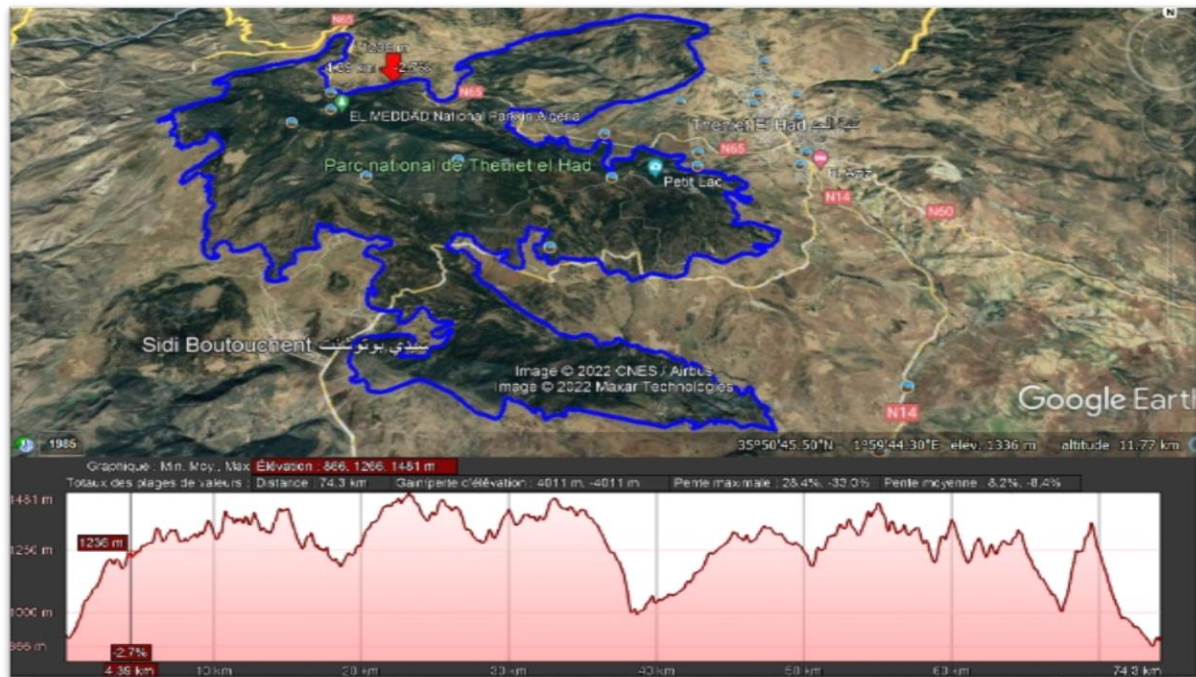
### 5.2.1. Objectifs

Cette étude a pour objectif de décrire l'évolution du dépérissement du cèdre de l'Atlas au détriment des changements climatiques qui touche le globe terrestre, dans le cadre où les étages bioclimatiques des régions connaissent des migrations vers le Nord laissant des climats plus rigides s'installer. Il s'agit de faire une reconstruction des conditions climatiques qu'a connu les cédraies de l'Ouarsenis et de voir l'évolution du dépérissement dans cet intervalle climatique obtenu à partir des cernes des arbres de cèdre. De plus, une étude de l'évolution des cédraies de l'Ouarsenis à partir des images satellitaires serait d'une importance non négligeable dans la description de l'effet des changements climatiques sur la superficie des cédraies.

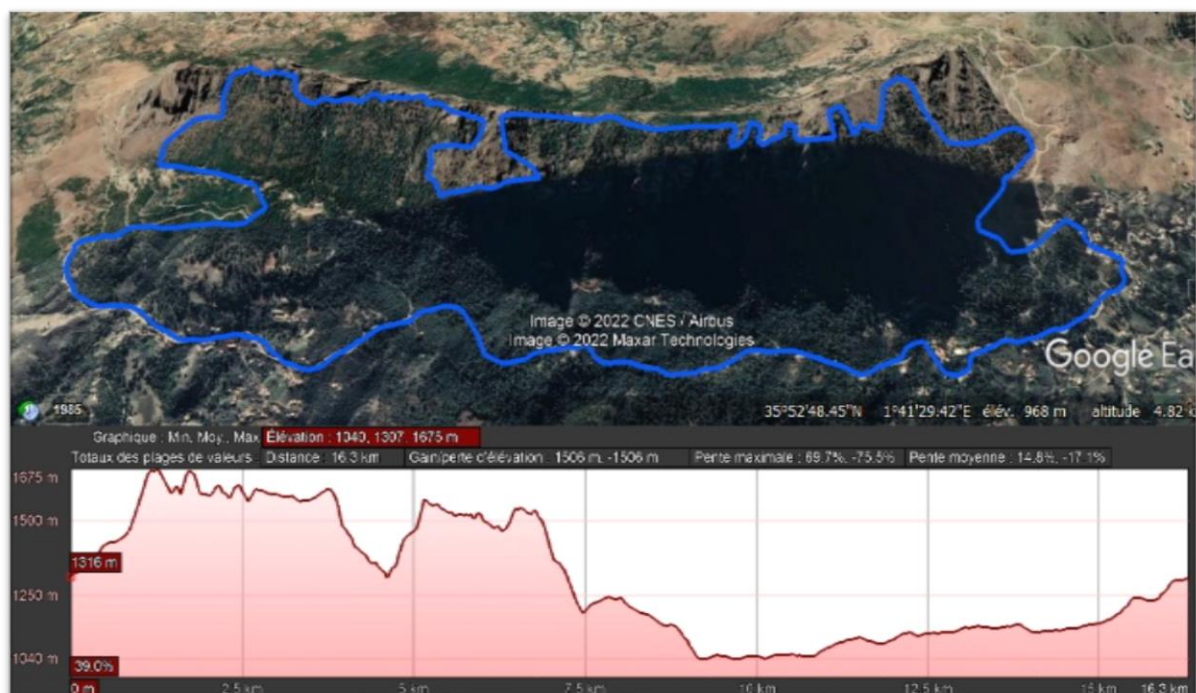
Le dépérissement est un phénomène complexe évolutif dû généralement à plusieurs facteurs interagissant ensemble ou séparément causant la mortalité des arbres (Sinclair, 1964, 1967 et Manion, 1988). Une étude relationnelle entre les facteurs éco-dendrométriques et le



dépérissement sera d'un intérêt certain pour avoir une idée sur les facteurs qui contribuent dans le processus du dépérissement. Le massif de l'Ouarsenis comprend deux compartiments bien distincts l'un de l'autre (**Fig. 25 et 26 bis**), il s'agit des cédraies de Theniet El Had et de Ain Antar.



**Figure 25.** Cédraies de Theniet El Had avec profil orographique



**Figure 26 bis.** Cédraies de Ain Antar avec profil orographique

La cédraie de Theniet El Had s'étale sur le versant nord et sud de Djebel El Meddad, dans un intervalle altitudinal de 1300 à 1786 (le point culminant appelé Ras El Braret). Elle repose sur un substrat gréseux et marneux et occupe une superficie d'environ 1000ha. Il est présent à l'état pur dans les hautes altitudes et en mélange avec le chêne vert, le pin d'Alep et le chêne liège dans les basses altitudes (**Anonyme, 1984 et Azzira, 2002**).

La cédraie d'Ain Antar s'étale sur environ 500 ha, elle se situe sur le versant nord de Sraa Sidi Abdelkader dans un intervalle altitudinal allant de 1000 à 1600m. la présence des arbres de cèdre millénaires est très répandue vu les croyances dominantes dans la région, d'ailleurs Sultane et Soltana sont les plus grands arbres considérés comme monument de cette zone.

La régénération est fortement abondante dans les clarières à savoir dans le Nord-Est de la cédraie. Le dépérissement est très faible dans cette cédraie voire même rare par rapport au parc national de Theniet El Had.

Pour opérer ce travail, des données d'ordre écologiques, dendrométriques et cartographiques ont été récoltées selon le protocole suivant :

### **5.2.2. Choix et installation des placettes**

Au total, 50 placettes ont été installées au niveau de la cédraie de Theniet El Had et 10 autres placettes au niveau de la cédraie d'Ain Antar. Les placettes, circulaires d'une superficie de 1000 m<sup>2</sup> ont été implantées là où le dépérissement se focalise. L'installation des placettes a été effectuée selon la méthode classique (la mire de Parde et le dioptré d'un Blum leiss).

La position géographique à l'aide du GPS, l'altitude, un profil pédologique, la hauteur et la circonférence des arbres de cèdre (dépéris et sains) ont été prélevés dans chaque placette. Au total, 778 tiges de cèdre y sont recensées dont 214 dépéris.

En plus, un carottage à l'aide de la tarière de Pressler d'une longueur de 80 cm a fait l'objet de 11 placettes à raison de deux prélèvements par placette sur des arbres sains. Au total, 22 prélèvements ont été récoltés.

Étant donné que la cédraie de Theniet El Had est la plus touchée par le fléau du dépérissement, la quasi-totalité des cylindres de bois (carottes) ont été récoltés dans cette forêt, soit 20 carottes. Les deux restantes ont été prises dans la cédraie d'Ain Antar.

Les individus sélectionnés sont de statut dominant, sains et loin d'être soumis à des conditions microclimatiques et à la compétition (**Lanier et al., 1994 et Amel et al., 2010**).

### 5.2.3. Données topographiques

#### 5.2.3.1. Altitude

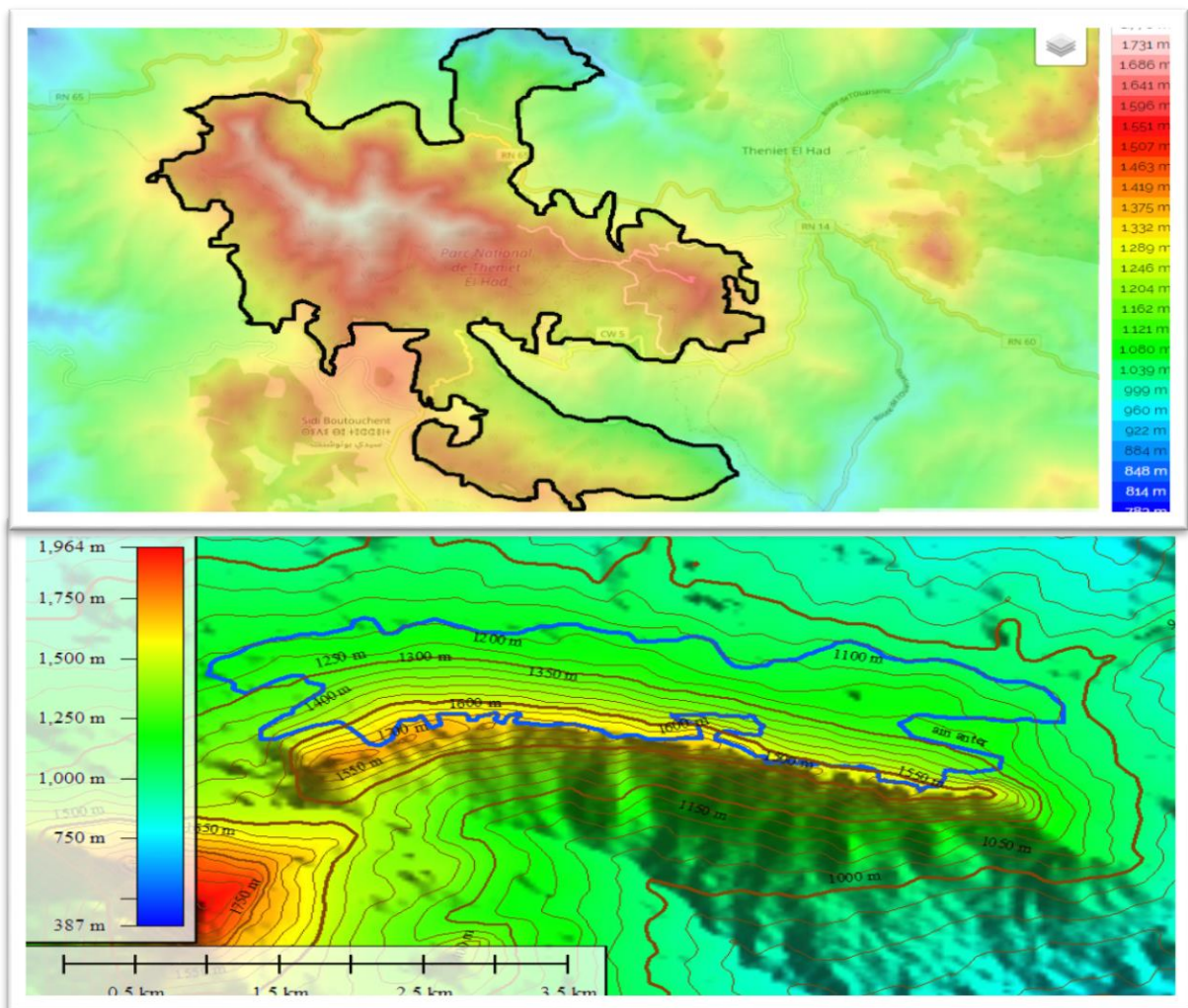
La variabilité altitudinale est un facteur conséquent dans la variation des précipitations et de la température, c'est en fonction de chaque 100m que la température varie d'environ 1°C et les précipitations selon la zone concernée (**Oswald, 1969 et Chbouki, 1994**).

#### 5.2.3.2. Pente

La pente est un paramètre de base dans la formation des ruissellements et l'érosion hydrique incluant, ainsi, une diminution d'infiltration des eaux (Guehl, 1984). La pente a été prélevé à partir du modèle numérique du terrain (MNT). Ce dernier présente plusieurs avantages, principalement (Puech et Bailly, 2003) :

- La caractérisation de la zone étudiée,
- La caractérisation des états de surface et des chemins de l'eau,
- D'identifier les relations spatiales entre objets,
- D'identifier les caractéristiques de chaque point dans la carte.

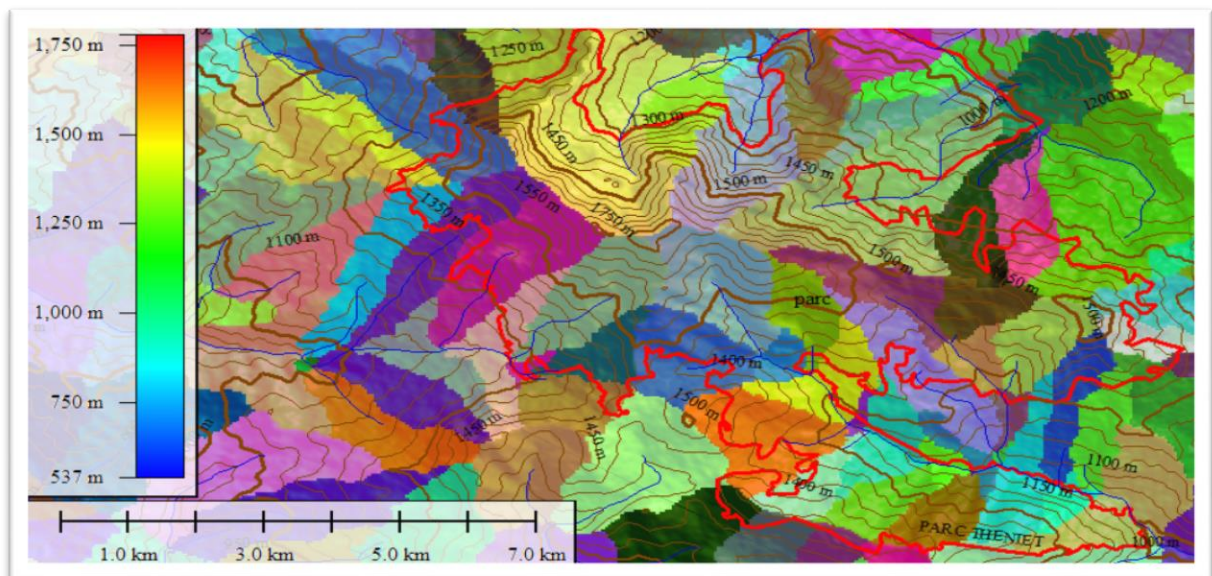
La zone d'étude comprend des pentes très faibles généralement avec des pentes abruptes dans les périphériques des cédraies (**fig. 27**).



**Figure 27.** MNT de la zone d'étude

### 5.2.3.3. Exposition

Selon la figure 28, la zone d'étude représente deux formations forestières montagnardes où l'exposition varie et varie avec elle la quantité de lumière reçue, l'humidité de l'air et les précipitations éprouvées. Car, entre l'exposition Nord et Sud, le climat diffère (Seigue, 1985).



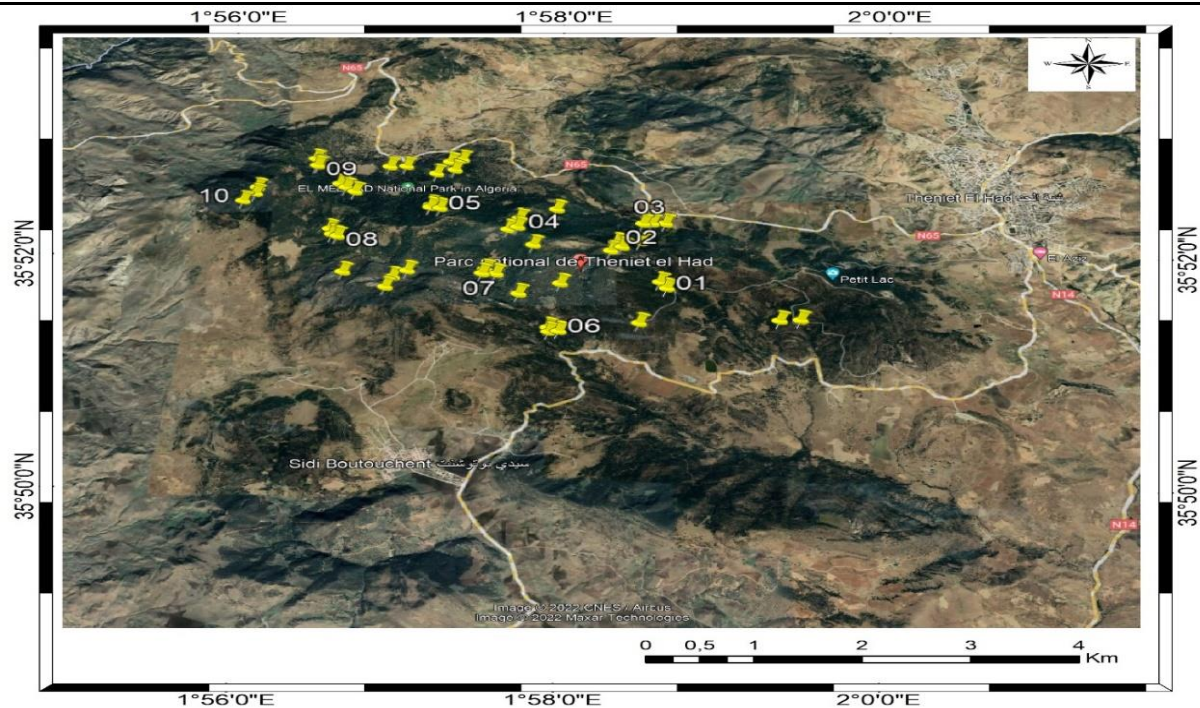
**Figure 28.** Carte des expositions du parc national de Theniet El Had

#### 5.2.4. Données Pédologiques

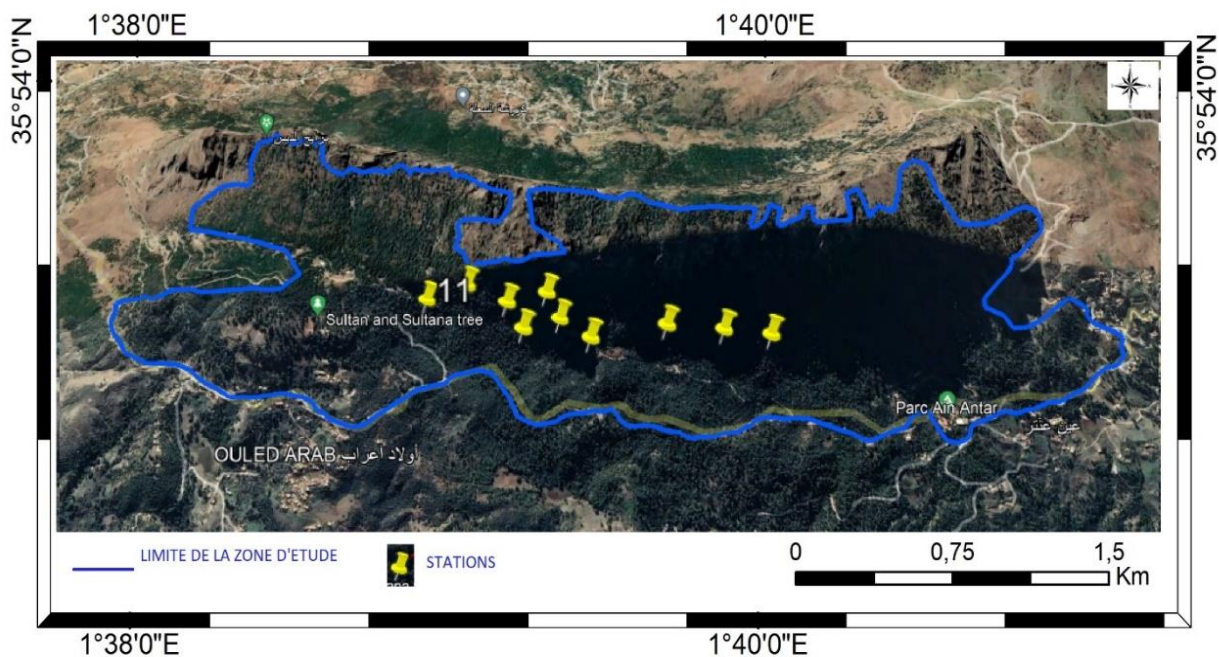
La pédologie est une science très vaste qui regroupe tout ce qui est en relation avec le sol. C'est un domaine hautement appréciable en matière d'influence sur la distribution spatiale des plantes et de leur pérennité. La vaste diversité des sols et de ses constituants ainsi que sa dynamique peuvent être à l'origine d'une déformation radicale du couvert végétale (Lavoisier, 2002). Pour cela une étude de la relation entre le dépérissement et le sol et d'une importance non négligeable.

##### 5.2.4.1. Échantillonnage de sol

Des profils de 05 à 60 cm de profondeur ont été réalisés à l'intérieur de chaque placette d'étude, soit un nombre de 60 profils. La variabilité de la profondeur des profils est essentiellement dû à la nature de la zone d'étude montagnarde par excellence, caractérisée par un sol jeune et une roche mère superficielle.



**Figure 29.** Plan d'échantillonnage de notre zone d'étude (Parc de Theniet El Had)



**Figure 30 bis.** Plan d'échantillonnage de notre zone d'étude (Cédraie de Ain Antar)

Un prélèvement de sol entre 01 et 1,5 Kg de terre a été effectué dans chaque profil et mis dans des sachets en plastique étiquetés.

#### 5.2.4.2. Analyses physico-chimiques

Les échantillons récoltés ont fait l'objet de différentes analyses dans le laboratoire selon le protocole suivant :

## A. Granulométrie

L'analyse granulométrique à 5 fractions des échantillons de sols prélevés a été réalisée après attaque de la matière organique à l'eau oxygénée. La séparation des particules supérieures à 0,05 mm s'effectue par tamisage. Pour séparer et classer les particules plus fines, la méthode utilisée est celle de la pipette Robinson qui est basée sur la loi de Stokes (**Bruand et Chenu, 1994**). La matière organique est déterminée par la méthode de **Walkley et Black (1934)**. Son taux est estimé en multipliant le % de carbone organique par 1.724.

### *Séchage*

Avant la majorité des analyses physico-chimiques, le sol doit être séché à des températures ambiantes. Ceci est effectué dans le but d'éliminer le poids de la phase liquide du sol. Les échantillons devront être pesés à plusieurs reprises.

### *Le tamisage*

Le sol doit être généralement broyé à l'aide d'un mortier et tamisé avec un tamis à 2 mm pour les différentes analyses physico-chimiques du sol. Cependant il y'a des analyses qui exigent un tamisage beaucoup plus fin on peut aller jusqu'à 0,3 mm.

- Teneur en sables grossiers (200 à 2 000  $\mu\text{m}$  soit 2 mm) ( $\text{‰} = \text{g/kg}$ ).
- Teneur en sables fins (50 à 200  $\mu\text{m}$ ) ( $\text{‰} = \text{g/kg}$ ).
- Teneur en limons grossiers (20 à 50  $\mu\text{m}$ ) ( $\text{‰} = \text{g/kg}$ ).
- Teneur en limons fins (2 à 20  $\mu\text{m}$ ) ( $\text{‰} = \text{g/kg}$ ).
- Teneur en argiles granulométriques ( $< 2 \mu\text{m}$ ) ( $\text{‰} = \text{g/kg}$ ).

Nous avons pesé 1000 g d'échantillon de sol est l'avons traité avec une solution de dispersion et placée sur un agitateur à plat pour désagréger les particules de sol.

L'échantillon est ensuite passé dans un tamis dégradé de 2000  $\mu\text{m}$ . La solution passe à travers le tamis et est recueillie dans un cylindre de sédimentation pour se stabiliser pendant la nuit. L'échantillon est mélangé dans le cylindre de sédimentation et les lectures de l'hydromètre sont prises à 7 heures. La lecture de l'hydromètre décompose les niveaux de sable, de limon, d'argile et d'humidité dans l'échantillon.

### *Séparation de la terre Fine*

Nous avons adapté l'équipement à utiliser en fonction du type et de la taille de l'échantillon et avons préparé à la main des échantillons qui semblaient sablonneux à l'œil nu ou notre main ou de petits volumes et nous avons utilisé du lisier de fonte pour de petites quantités de sol argileux où nous avons utilisé le mortier de porcelaine dans un sol sablonneux. Et pour le démontage, on utilise un pilon en bois dur pour sol oxydé.

$$\text{Refus \%} = 100 * P_r / (P_{tf} + P_r.)$$

Soit en g

$P_{tf}$  = Poids de terre fine ( $\leq 2.00$  mm)

$P_r$  = Poids de refus ( $> 2.00$  mm)

### ***Détermination du taux d'éléments grossiers***

Une fois les échantillons de sols broyés et disloqués, on procède ensuite à un tamisage avec un tamis de 2 mm. Ainsi, on sépare la terre fine des cailloux et des graviers. Le protocole détaillé de la préparation a été décrit par **Baise (2000)**.

### **B. Humidité**

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer l'humidité du sol, chacune ayant ses avantages et ses limites. Les méthodes les plus courantes sont :

Nous avons choisi la méthode la plus appropriée en fonction des caractéristiques du sol, des coûts et des besoins de mesure. Il est également important de considérer la fiabilité et la précision de la méthode choisie pour mesurer l'humidité du sol.

**Mesure du poids du sol** : On mesure le poids du sol sec, puis le poids du sol humide et on calcule le pourcentage d'humidité à partir de ces deux mesures

### **C. Capacité d'Echange Cationique (CEC)**

#### ***Pâte saturée***

Nous pesons 200 g de sol sec tamisés à 2mm. Nous les mettons dans une boîte plastique de 100ml puis nous procédons à la préparation de la pâte saturée par l'ajout progressif de l'eau distillée pour humecter le sol qu'à malaxer la solution à l'aide d'une spatule. Une fois, la pâte devient brillante, nous y créons une fente moyennant une spatule. Ainsi, si la fermeture de cette cicatrice se fait rapidement, nous devons cesser l'ajout de l'eau distillée. Nous munissons la boîte d'un couvercle étanche, en laissant la pâte en repos pendant 2 heures au minimum.

Après 2 heures, la pâte est mise dans un dispositif en connexion avec une pompe à vide qui fait la filtration de la solution du sol (extrait de la pâte saturée).

Nous recueillons l'eau de filtration par décantation. La solution récupérée dans un flacon sert à la mesure le ph et de la conductivité électrique moyennant un ph mètre et conductimètre de laboratoire. Les valeurs obtenues de la conductivité électrique doivent être corrigées afin de les rendre à la même échelle de température (25 °C).



### ***Dilution***

En général, les sols de la région étudiée apparaissent presque différents entre les stations et avec une prédominance de la classe de pH entre 7 et 10,8 avec une incidence cumulée de 82 %, ce qui représente près de 89 % de tous les échantillons.

### **D. Matière organique**

La teneur en matière organique n'est pas une donnée utilisée pour adapter les recommandations de fertilisation. Néanmoins, elle joue un rôle important dans la fertilité du sol en amplifiant grandement la capacité d'échange cationique du sol et en retenant les nutriments assimilables par les plantes. Ainsi, la matière organique est un réservoir de nutriments lentement assimilables.

Avec un domaine d'étalonnage se situant entre 1 et 50 %, la matière organique est déterminée par incinération (perte au feu ou perte par calcination) qui permet de mesurer directement la matière organique dans le sol. Ainsi, des échantillons de sol de 10g (un de chaque station) ont été placés pendant une nuit (16 heures) dans un four à moufle à 375 °C. La perte de poids, après calcination, nous donne la matière organique.

### **E. Potentiel Hydrogène (pH)**

Le pH d'un sol est très important du point de vue de l'alimentation des plantes puisque la disponibilité des éléments nutritifs en dépend (**Bates, L.S.,1973**). Le pH et la composition du sol varient au cours d'une année, en raison surtout de l'humidité du sol ; ces différences, toutefois, ne sont pas suffisamment importantes ni assez constantes pour avoir un effet sur le plan de gestion des éléments nutritifs. Mais le fait de prélever les échantillons de sol à la même période de l'année élimine les variations saisonnières dans les comparaisons des résultats d'analyse d'une fois à l'autre.

### **F. Calcaire total**

Le principe consiste à titrer l'excès de l'oxalate, par la manganimétrie et par la différence avec le résultat obtenu par l'oxalate d'ammonium départ (témoin) on estime le nombre d'ion gramme d'oxalate précipités et par la suite le nombre de mole de calcaire actif extrait.

### **G. Conductivité électrique (CE)**

Elle permet d'obtenir rapidement la teneur globale en sels dissous ; elle est mesurée à l'aide d'un conductivimètre, exprimé en mmhos / cm dont le rapport de terre est de 1/5 à 25 °C.

### **5.2.5. Données dendrométriques**

#### **5.2.5.1. Hauteur dominante**

Encore considérée comme indice de productivité, la hauteur dominante est un paramètre dendrométrique fortement lié aux facteurs stationnels qu'aux facteurs de compétition. La hauteur dominante correspond à la moyenne des cent plus grands arbres à l'hectare (**Rondeux, 1993 ; Rondeux et al., 1995**).

#### **5.2.5.2. Circonférence dominante**

Elle correspond à la moyenne des cent plus grands arbres à l'hectare. Comme la hauteur dominante, la circonférence dominante est étroitement liée à la fertilité stationnelle (**Rondeux, 1993**).

#### **5.2.5.3. Hauteur moyenne**

C'est un excellent paramètre d'identification de la composition des peuplements. La hauteur moyenne, contrairement à la hauteur dominante, est fortement liée à la compétition entre les tiges, d'ailleurs une grande compétition émet un élancement fort considérable des tiges. Elle correspond à la moyenne de toutes les tiges recensées (**Rondeux, 1993**).

#### **5.2.5.4. Circonférence moyenne**

C'est un paramètre dendrométrique fortement lié à la compétition interindividuelle, c'est-à-dire, un bon espacement entre tiges correspond à un bon développement en surface terrière. C'est la moyenne de toutes les tiges recensées (**Rondeux, 1993**).

#### **5.2.5.5. La densité totale**

Du fait que le parc national de Theniet El Had et la forêt d'Ain Antar ressemblent à la quasi-totalité des forêts algériennes (des forêts jardinées) et qui ne sont soumis malheureusement à aucun programme sylvicole préalablement étudié.

La densité correspond au nombre total de cèdre par hectare. Très variable d'une station à une autre, elle présente un paramètre non négligeable dans l'étude du dépérissement afin de savoir si ce fléau est influencé par les grandes densités.

### **5.2.6. Données dendrochronologiques**

Les données dendrochronologiques sont des données relatives à la croissance des arbres, qui peuvent être utilisées pour étudier divers aspects de l'environnement et du climat.

Les données dendrochronologiques peuvent être utilisées pour :

- Dater les arbres et les structures en bois.
- Étudier les variations du climat et de l'environnement au fil du temps.
- Évaluer la santé et la croissance des forêts.
- Comprendre la vulnérabilité des forêts aux maladies et aux incendies.
- Étudier les effets des activités humaines sur les forêts, telles que la coupe forestière et la déforestation.

Les données dendrochronologiques peuvent être utilisées en combinaison avec d'autres sources de données, telles que les données de température et d'humidité, pour mieux comprendre les processus environnementaux complexes (**Cook and Kairiukstis, 1990**).

#### 5.2.6.1. Echantillonnage (carottage)

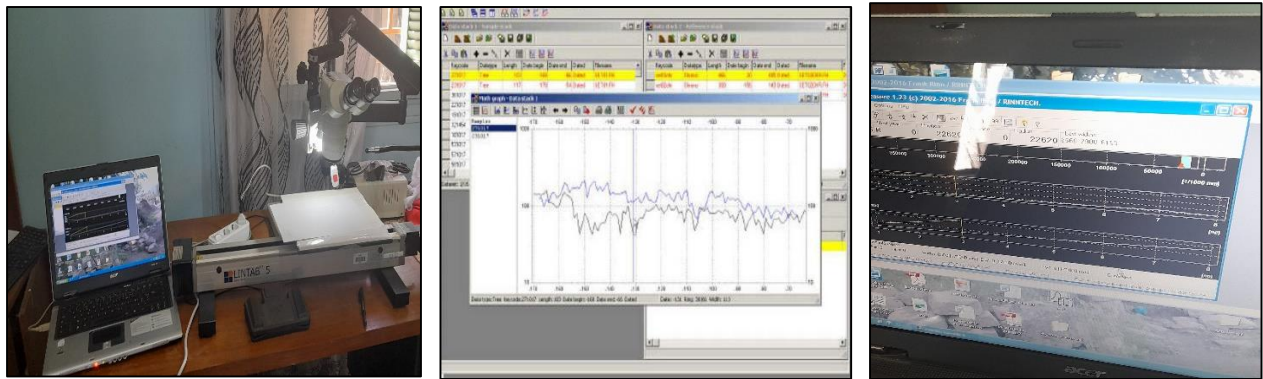
A l'aide de la tarière de Pressler de 80cm de longueur (Fig. 31)., à hauteur d'homme (1.30m), des carottes ont été prélevées sur des sujets de cèdre (sains et dépéris). Les carottes ont été collées sur des réglettes en bois préalablement rainurées à leur diamètre, poncées et nettoyées.



**Figure 31.** Tarières de Pressler

#### 5.2.6.2. Traitement et analyse

Le traitement et l'analyse des données dendrochronologiques ont été réalisés au laboratoire de l'INRF d'Azzazga (Tizi Ouzou). L'interdatation et les mesures des largeurs de cernes (LC) ont été effectuées à l'aide de la machine Lintab5 à 1/1000 mm (Fig. 32) dotée d'une loupe binoculaire à fort grossissement et couplée au logiciel TsapWin (Time Series Analysis and Présentation) pour l'acquisition et l'enregistrement des données.



**Figure 32.** Table de mesure Lintab5 et logiciel associé TSAPWin

### 5.2.7. Données sur l'occupation du sol

L'objectif est d'établir, à partir des images satellitaires téléchargées depuis Landsat 5 et 8 des cartes diachroniques présentant l'évolution de l'occupation du sol, plus spécialement, l'état de la cédraie à différentes époques. Il s'agit d'assoir des cartes thématiques à l'aide de l'ARCGIS, QGIS et Global Mapper depuis 1985 jusqu'à 2020.

### 5.2.8. Données climatiques

Les données climatiques utilisées pour la zone d'étude sont celles de Seltzer (1946), pour les températures sont celles de 1913 à 1934 utilisées par Sarmoum (2008) et du site climate-data.org (2022) pour une période s'étalant de 1990 à 2021. Il s'agit de voir l'évolution de ces principaux paramètres afin de caractériser le climat durant ces périodes et d'acquérir une vision claire sur l'ampleur du changement climatique et de mettre en évidence les résultats obtenus avec le processus du dépérissement dans les deux cédraies étudiées.

### 5.2.9. Traitement statistique des données (ANOVA et ACP)

Toutes les données ont fait l'objet d'un traitement statistique ANOVA afin de déterminer les principales relations entre les différents paramètres pris en considération et pour un travail complémentaire ultérieur, l'ACP pour voir les différentes tendances et relations qui peuvent exister entre certains groupes de facteurs et de paramètres (variables et individus).

# **Chapitre IV**

## **Résultats et discussions**

Ce chapitre est apprêté à faire ressortir les résultats obtenus pour les trois axes déjà décrits dans les parties précédentes, soit les relations éco-dendrométrie - dépérissement, la reconstitution du climat de la zone d'étude à partir des cernes prises et enfin une étude relationnelle entre la variabilité climatique et l'état de recouvrement du cèdre sur une période de 35 ans soit de 1985 à 2020 pour manque d'image satellitaire avant cette date.

## 6.1. Synthèse de l'analyse comparative du dépérissement

### 6.1.1. Relation Dépérissement – Dendrométrie

#### 6.1.1.1. Dépérissement – Hauteur dominante et Circonférence dominante

Les données dendrométriques sont des variables qui reflètent le mieux l'état du milieu et la structure des peuplements.

La répartition spatiale du dépérissement, dans la zone d'étude, se manifeste sous forme de tâches dimensionnellement variables et semble être d'une relation étroite avec la variabilité de la structure des peuplements du cèdre. Ainsi, l'identification de cette relation entre le dépérissement et la structure du peuplement manifestée par la variabilité dendrométrique. Celle-ci démontre davantage les interactions inter et intra spécifiques, la productivité, la production et la vitalité des peuplements (**Rondeux, 1993 et Rondeux et al., 1995**).

De ce fait, la hauteur dominante, la circonférence dominante, la hauteur moyenne, la circonférence moyenne et la densité totale feront l'objet d'une étude statistique démontrant, ainsi, le rapport dépérissement – variabilités dendrométriques.

La hauteur dominante présente un indice reflétant d'une façon directe les critères écologiques entourant, soit la fertilité stationnelle.

Selon **les figures (33 & 34)**, le dépérissement est quasiment stable le long des hauteurs et circonférences dominantes des peuplements recensés. D'ailleurs, l'analyse de la variance démontre que le paramètre dépérissement est totalement indépendant à la hauteur et circonférence dominante (**Tab. 08**). Ce résultat considère clairement que le dépérissement est loin d'être lié à la fertilité stationnelle du fait que la hauteur et la circonférence dominante sont soumis aux conditions du milieu et loin d'être influencé par les paramètres compétitifs.

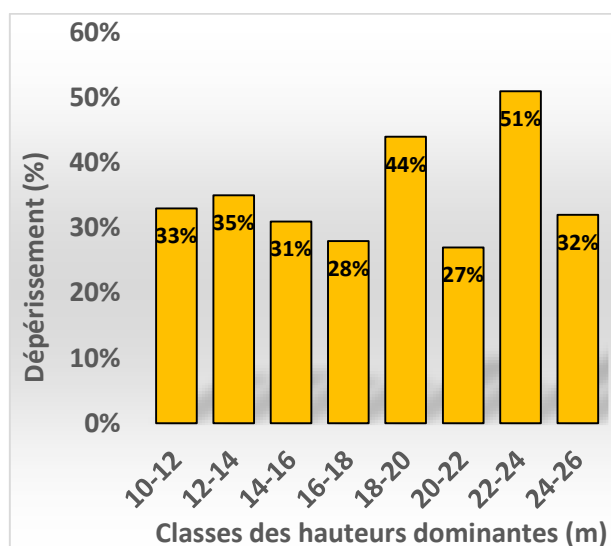


Figure 33. Relation : Dépérissement - Hauteur dominante

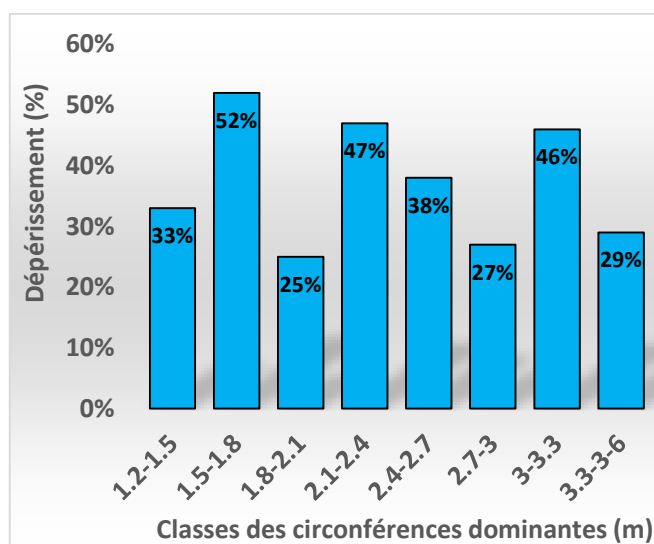


Figure 34. Relation : Dépérissement - Circonférence dominante

#### 6.1.1.2. Dépérissement – Hauteur moyenne et Circonférence moyenne

La compétition entre arbre peut s'exprimer par la hauteur moyenne et la circonférence moyenne, c'est ainsi que la relation entre dépérissement et hauteur moyenne d'une part, et la circonférence moyenne d'une autre part, présente un intérêt important dans la description de ce fléau.

Selon les figures (35 & 36), le dépérissement ne présente aucune variabilité à travers les différentes hauteurs moyennes enregistrées contrairement à la variabilité des circonférences moyennes où il est important dans les grandes circonférences. D'ailleurs, l'ANOVA fait remarquer que le dépérissement est indépendant à la hauteur moyenne et en relation proportionnelle avec la circonférence moyenne (Tab.08).

Cette situation ne peut qu'expliquer la souffrance des peuplements de cèdre soumis à la compétition pour un espace vital. Ce résultat a été déjà signalé par (Taleb, 2017) où il indique que la compétition entre arbre joue le rôle de facteur prédisposant dans le processus de dépérissement.

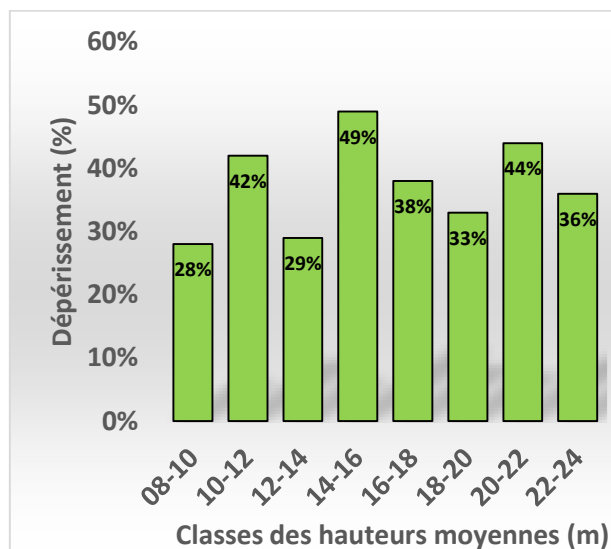


Figure 35. Relation : Dépérissement - Hauteur moyenne

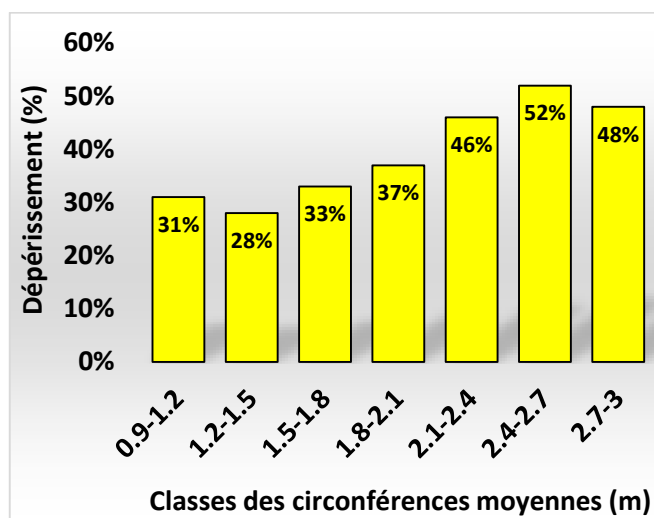


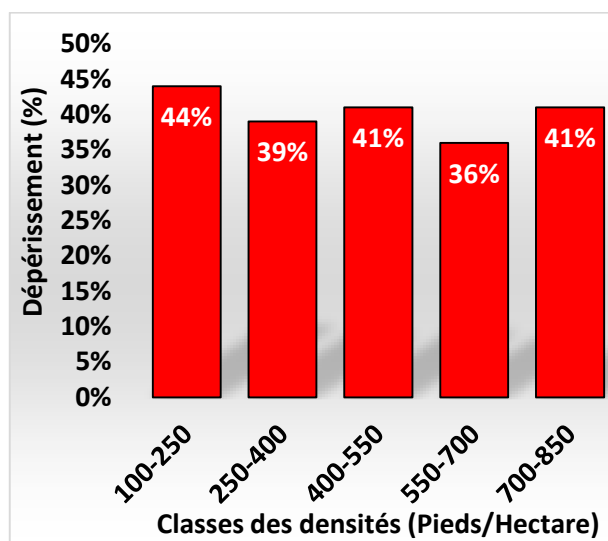
Figure 36. Relation dépérissement - Circonférence moyenne

### 6.1.1.3. Dépérissement – Densité totale

La densité correspond au nombre de tiges par une superficie, c'est une mesure quantitative qui explique l'état du couvert. En foresterie, la mesure de la densité peut être exprimée par le nombre d'arbre le volume ou encore par la surface terrière par hectare (Alteyrac, 2005).



L'analyse de la variance à un facteur appliquée pour la relation dépérissement-densité émet une relation non significative (**Tab 08.**). En effet, la figure 37 démontre que le dépérissement ne présente aucune allure homogène le long de la variabilité de la densité.



**Figure 37. Relation : Dépérissement - Densité totale**

**Taleb (2017)** relate que le dépérissement n'est pas lié directement à la densité mais à la disposition chaotique des cèdres du fait que la forêt n'est soumise à aucun travail sylvicole et que le dépérissement se manifeste sous forme de bouquet.

**Tableau 08. Analyse de la variance entre variables dendrométriques et le dépérissement**

Variable dendrométrique	F observé	F théorique	Résultat
Hauteur dominante	0.452	0.938	Non Significatif
Circonférence dominante	0.682	1.526	
Hauteur moyenne	0.945	1.288	<b>Significatif</b>
Circonférence moyenne	<b>1.187</b>	<b>0.841</b>	
Densité totale	0.533	1.623	Non Significatif

### 6.1.2. Relation Dépérissement – Paramètres écologiques

Il s'agit de faire ressortir d'éventuelle relation entre le dépérissement et les facteurs de milieu qui, en général, influent sur l'état sanitaire de l'arbre par son influence sur le microclimat du milieu ou la richesse en élément nécessaire au développement de l'arbre. Ainsi, les paramètres étudiés sont l'altitude, la pente, la texture du sol, le pH du sol et la richesse en matière organique.

### 6.1.2.1. Dépérissement – Altitude

L'altitude est un facteur qui influe d'une manière directe sur les conditions climatiques, températures et précipitations, et par conséquent sur la répartition des essences forestières (Chbouki, 1994). De plus que l'étagement altitudinale est important, de plus que la succession végétale est variable, c'est à travers l'augmentation de l'étagement altitudinale que les espèces disparaissent laissant, ainsi, l'installation de nouvelles essences, c'est-à-dire des conditions favorables pour la deuxième espèce et défavorables pour la première.

La relation étagement altitudinale et dépérissement divulgue une différence non significative (Tab. 08) et (Fig.38). Un résultat totalement cohérent du fait que le cèdre se trouve dans son aire naturelle.

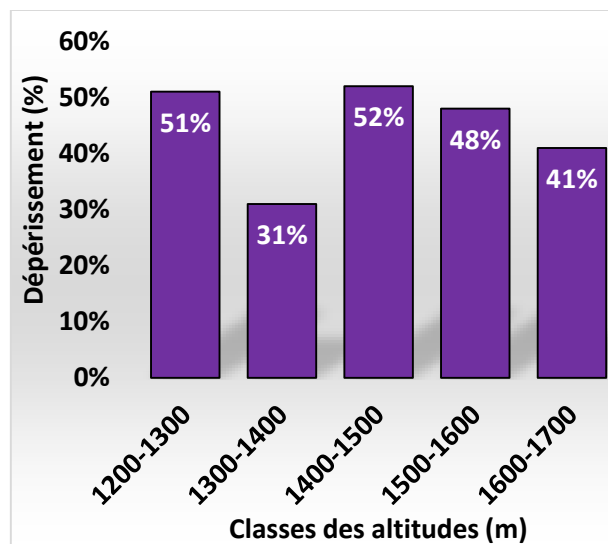


Figure 38. Relation : Dépérissement - Altitude

### 6.1.2.2. Dépérissement – Pente

La rétention et la perte des eaux de précipitation sont souvent liées à la nature du sol et la pente du terrain (Chbouki, 1994).

Quoique la pente de la zone d'étude présente une variabilité importante, entre 5° et 27°, le long des placettes installées, l'analyse de la variance n'indique aucune relation entre le dépérissement et la pente (Tab. 09) et (Fig. 39). Ce résultat décrit l'adaptation du cèdre à des fortes pentes du fait qu'il couvre, dans l'ensemble, les montagnes.

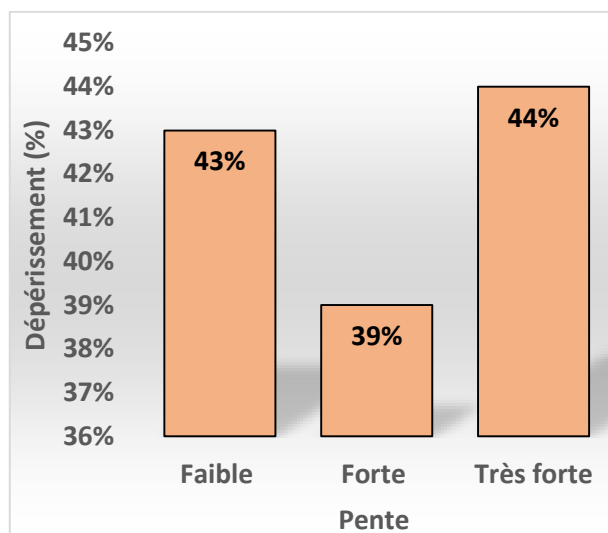


Figure 39. Relation : Dépérissement-Pente

### 6.1.3. Relation Dépérissement – Paramètres physico-chimiques

#### 6.1.3.1. Dépérissement – Texture du sol

La texture du sol de la zone d'étude est dans l'ensemble limoneuse à limono-sableuse et correspond à la qualité texturale appréciée par le cèdre de l'Atlas (Lecomte, 2007). De ce fait, l'ANOVA divulgue une indépendance entre le dépérissement et la texture du sol (Tab. 09) et (Fig. 40).

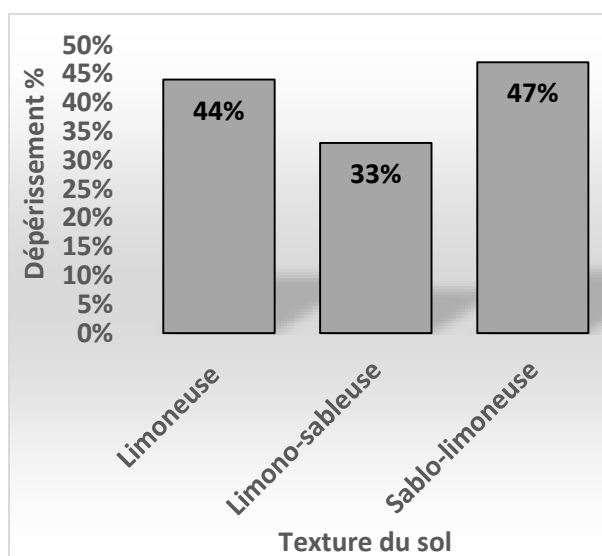
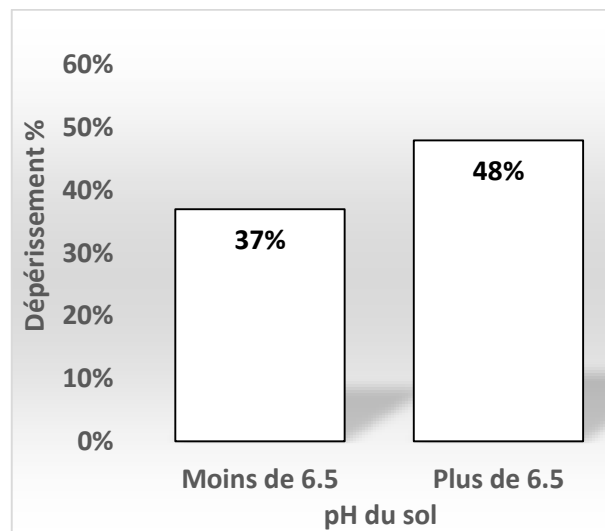


Figure 40. Relation : Dépérissement - Texture du sol

#### 6.1.3.2. Dépérissement – pH du sol

Le pH du sol dans la zone d'étude présente, dans l'ensemble, une très faible variabilité entre 6.5 et 6.9 ce qui explique un résultat non significatif de l'ANOVA (Tab. 09) et (Fig. 41).

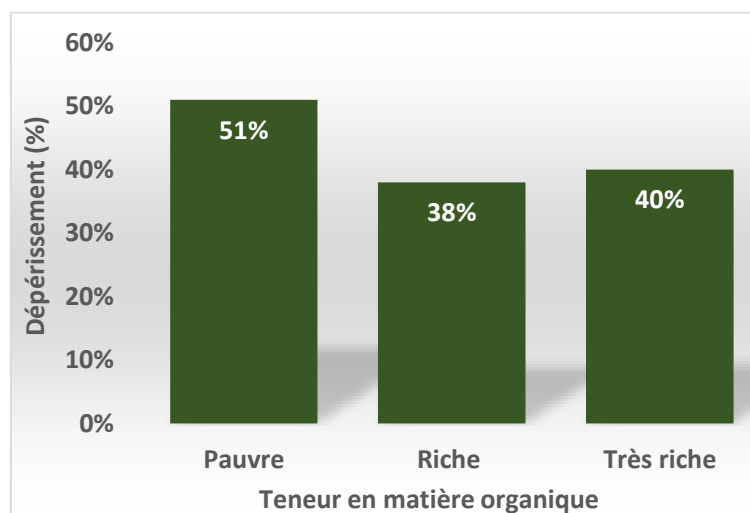


**Figure 41. Relation : Dépérissement - pH du sol**

### 6.1.3.3. Dépérissement – Matière Organique

A travers la teneur en matière organiques, les sols sont organisés en trois classes pauvre, riche et très riche.

L'ANOVA relate une différence non significative entre le dépérissement et la matière organique (**Tab. 09**) et (**Fig. 42**). Cela est dû essentiellement à l'accommodation du cèdre avec les sols pauvres.



**Figure 42. Relation : Dépérissement - Taux de matière organique**

**Tableau 09. Analyse de la variance entre variables édaphiques et le dépérissement**

Variables écologiques	F observé	F théorique	Résultat
Étageement altitudinal	0.322	0.859	
Pente du terrain	0.276	0.635	
Texture du sol	0.629	1.532	Non significatif
Ph du sol	0.828	1.770	
Taux de la matière organique	0.472	0.957	

## 6.2. Synthèse de l'analyse dendrochronologique

L'étude dendrochronologique dans cette partie est basée sur la reconstitution de la variabilité climatique à travers l'analyse des cernes récoltés du parc national de Theniet El Had et de la forêt d'Ain Antar.

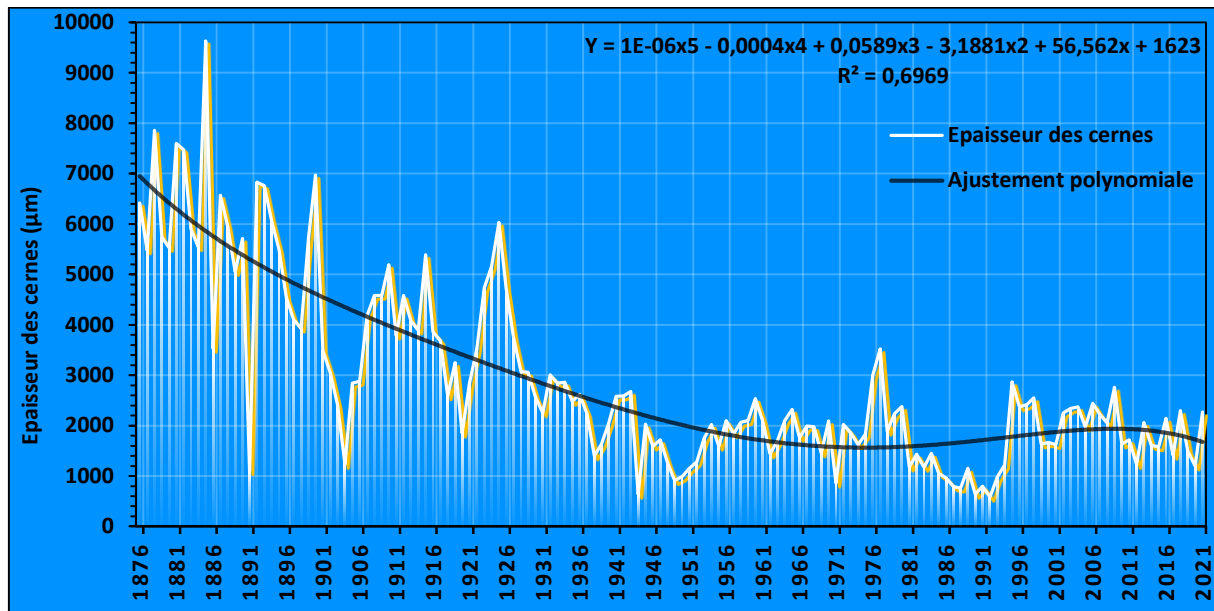
Le principe de l'étude correspond à la réalisation des séries maîtresses pour chacune des placettes, soit un nombre total de 11 séries, afin de schématiser la variabilité de l'épaisseur des cernes. Le choix des séries maîtresses repose sur le fait que ces dernières sont soumises essentiellement aux changements climatiques à travers les précipitations et les températures (Messaoudène, 1989 ; Sarmoum, 2016). D'ailleurs, les études sur la croissance radiale des peuplements du cèdre de Theniet El Had réalisées par Sarmoum (2016) démontrent que le climat est le principal facteur influençant l'accroissement des cernes annuels.

L'ajustement de l'épaisseur moyenne des cernes par une courbe polynomiale serait d'une importance non négligeable dans l'analyse de l'allure générale de la variation à basse fréquence des séries maîtresses et par conséquent la variabilité du climat (Safar, 1994 in Sarmoum, 2016).

De plus, le recours à une méthode statistique pour la confirmation de l'existence d'un changement du climat à travers la variation à basse fréquence est hautement appréciable. Dès lors, l'utilisation de l'analyse de la variance à un facteur à un taux de signification de 99%, est appliqué sur l'ensemble des 11 stations.

- **Station 01** : L'épaisseur moyenne des cernes pour cette station s'étale sur une durée de 145 ans. Il est remarqué à partir de la schématisation de la variation à basse fréquence (Fig. 43) que la tendance générale d'épaisseur des cernes est en déclin avec de fortes baisses durant les périodes 1943-1952 et 1979-1994. D'ailleurs l'allure de l'ajustement polynomiale présente une tendance régressive jusqu'à l'année 1943 où l'allure générale devient stable dans un niveau inférieur à 2000 $\mu$ m.

L'application de l'analyse de la variance à un facteur et au seuil de signification de 99% à travers les différentes périodes d'années (**Tab. 10**) émet un résultat très hautement significatif ; celui-ci vient confirmer que la variabilité de l'épaisseur moyenne des cernes présente un changement non négligeable.



**Figure 43.** Courbe dendrochronologique avec ajustement polynômiale (station 01)

**Tableau 10.** Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l'épaisseur moyenne des cernes et l'évolution chronologique de la station 01

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Degré de liberté</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Valeur critique pour F</i>
<i>Entre Groupes</i>	347183191,43	4	86795797,86	80,09	6,61E-38	3,43
<i>A l'intérieur des groupes</i>	182061816,67	168	1083701,29			
<i>Total</i>	529245008,09	172				

- **Station 02 :** L'épaisseur moyenne des cernes pour cette station s'étale sur une durée de 148 ans. Il est remarqué à partir de la schématisation de la variation à basse fréquence (**Fig. 44**) que la tendance générale d'épaisseur des cernes est en déclin avec de fortes baisses durant les périodes 1949-1973 et 1988-1997. D'ailleurs l'allure de l'ajustement polynômiale présente une tendance régressive jusqu'à l'année 1955 où l'allure générale présente une légère augmentation dans un niveau d'environ 3000µm.

L'application de l'analyse de la variance à un facteur et au seuil de signification de 99% à travers les différentes périodes d'années (**Tab.11.**) émet un résultat significatif ; celui-ci

vient confirmer que la variabilité de l'épaisseur moyenne des cernes présente un changement non négligeable.

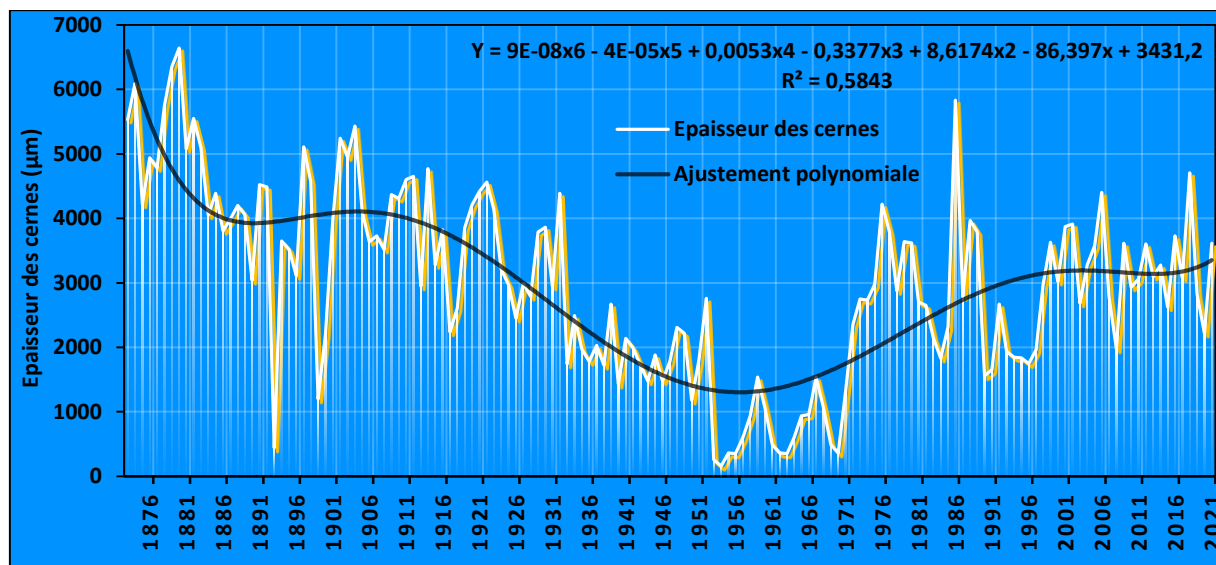


Figure 44. Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 02)

Tableau 11. Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l'épaisseur moyenne des cernes et l'évolution chronologique, station 02

Source des variations	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	136091006,10	4	34022751,53	16,67	1,22E-11	3,43
A l'intérieur des groupes	367365337,68	180	2040918,54			
Total	503456343,78	184				

- **Station 03 :** L'épaisseur moyenne des cernes pour cette station s'étale sur une durée de 352 ans. La schématisation de la variation à basse fréquence (Fig. 45) présente une tendance descendante jusqu'à 1979 où l'épaisseur prend une ampleur ascendante. L'allure de l'ajustement polynomiale présente une tendance régressive jusqu'à l'année 1972 où elle présente une augmentation vers 4000µm.

L'application de l'analyse de la variance à un facteur et au seuil de signification de 99% à travers les différentes périodes d'années (Tab. 12) émet un résultat significatif ; celui-ci vient confirmer que la variabilité de l'épaisseur moyenne des cernes présente un changement non négligeable.

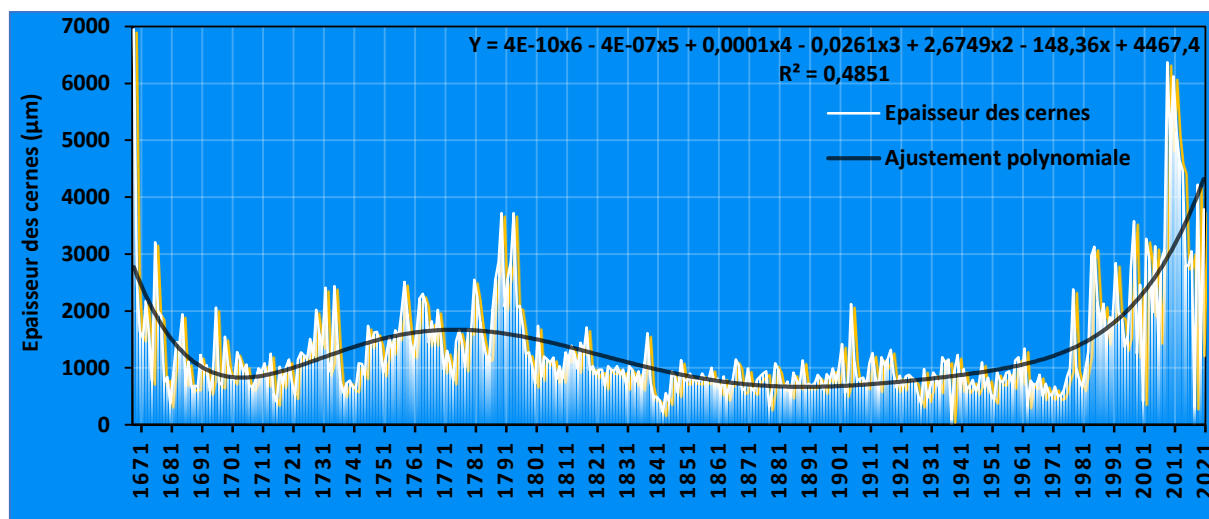


Figure 45. Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 03)

Tableau 12. Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l'épaisseur moyenne des cernes et l'évolution chronologique, station 03

Source des variations	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	128507267,47	11	11682478,86	23,50	8,88E-36	2,30
A l'intérieur des groupes	169524104,20	341	497138,13			
Total	298031371,67	352				

- Station 04 :** L'épaisseur moyenne des cernes pour cette station s'étale sur une durée de 193 ans. La schématisation de la variation à basse fréquence (Fig. 46) présente une tendance descendante avec un enregistrement de forte descente durant les périodes 1848-1857, 1885-1901, 1937-1955 et 1983-2007. L'allure de l'ajustement polynomiale présente une tendance générale régressive suivie par une stabilisation depuis 1969 à environ 1000µm.

Le résultat de l'analyse de la variance à un facteur et au seuil de signification de 99% à travers les différentes périodes d'années (Tab. 13) est très hautement significatif ; celui-ci vient confirmer que la variabilité de l'épaisseur moyenne des cernes présente des fluctuations importantes avec un aspect général diminuant.



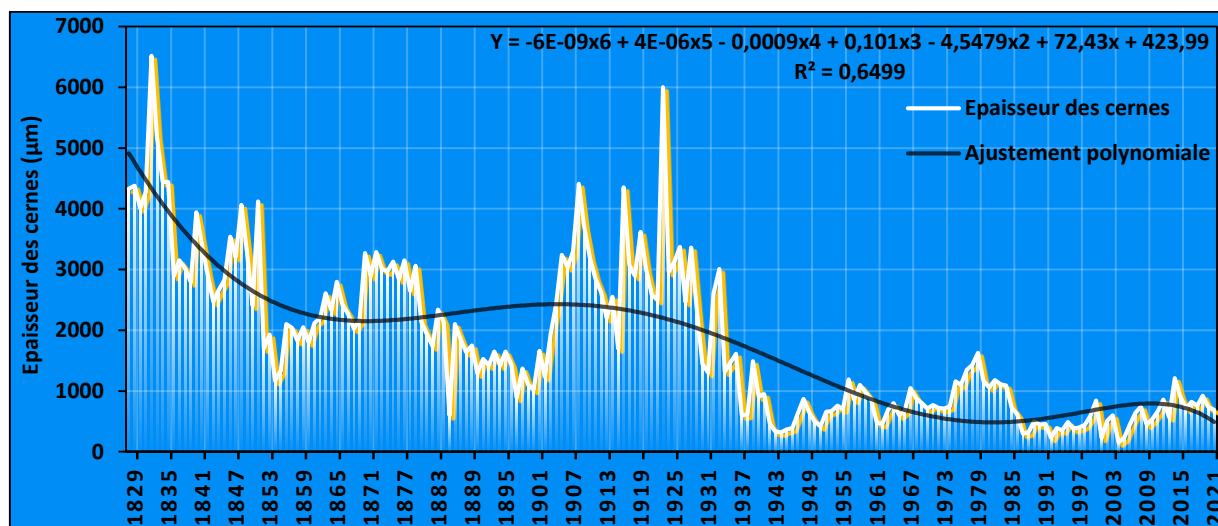


Figure 46. Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 04)

Tableau 13. Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l'épaisseur moyenne des cernes et l'évolution chronologique, station 04

Source des variations	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	216769840,99	6	36128306,83	76,83	7,94E-48	2,90
A l'intérieur des groupes	87938509,52	187	470259,41			
Total	304708350,52	193				

- Station 05 :** L'épaisseur moyenne des cernes pour cette station s'étale sur une durée de 129 ans. La schématisation de la variation à basse fréquence (Fig. 47) présente une tendance légèrement descendante avec un enregistrement de forte descente durant les périodes 1904-1910, 1926-1934, 1948-1958 et 1982-1995. L'allure de l'ajustement polynomiale présente une tendance générale stable à partir de 1926 à environ 1500µm.

L'analyse de la variance à un facteur et au seuil de signification de 99% à travers les différentes périodes d'années (Tab. 14) est très significatif ; ce résultat explique la grande variabilité l'épaisseur moyenne des cernes.

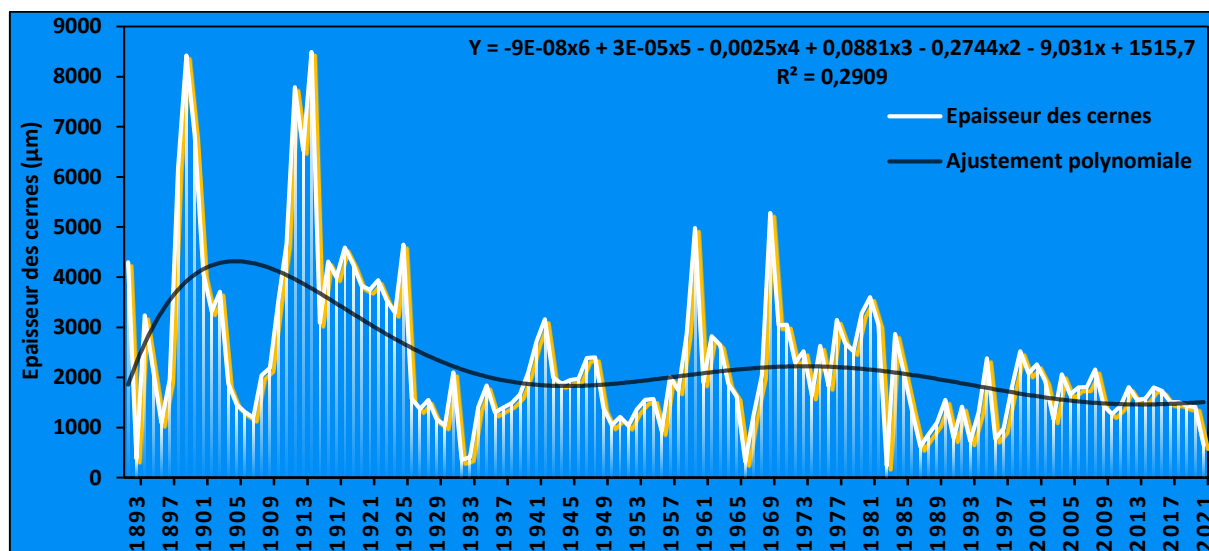


Figure 47. Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 05)

Tableau 14. Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l'épaisseur moyenne des cernes et l'évolution chronologique, station 05

Source des variations	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	79351969,74	4	19837992,44	10,81	1,47E-07	3,47
A l'intérieur des groupes	229354123,33	125	1834832,99			
Total	308706093,07	129				

- **Station 06 :** La schématisation de l'épaisseur moyenne des cernes pour cette station, s'étalant sur une durée de 334 ans (**Fig. 48**), présente une tendance descendante avec un enregistrement de forte descente durant les périodes 1698-1703, 1775-1783, 1797-1833, 1858-1870, 1895-1915, 1944-1954, 1965-1974 et 1989-1993. L'allure de l'ajustement polynomiale présente une tendance générale diminuante avec une stabilité depuis 1916 à environ 500µm.

L'analyse de la variance à un facteur et au seuil de signification de 99% à travers les différentes périodes d'années (**Tab. 15**) est significatif ; ce résultat explique la grande variabilité l'épaisseur moyenne des cernes avec une forte fluctuation durant le dernier siècle.

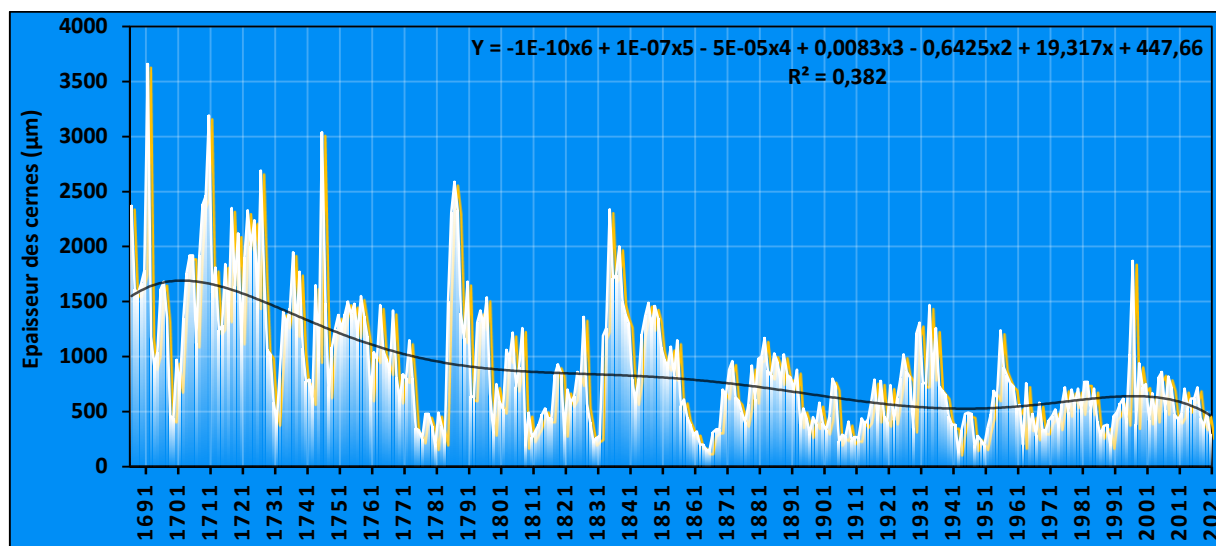


Figure 48. Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 06)

Tableau 15. Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l'épaisseur moyenne des cernes et l'évolution chronologique, station 06

Source des variations	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	42167344,68	11	3833394,97	17,88	1,05E-27	2,30
A l'intérieur des groupes	69263386,66	323	214437,73			
Total	111430731,34	334				

- **Station 07 :** La schématisation de l'épaisseur moyenne des cernes pour cette station, s'étalant sur une durée de 163 ans (**Fig.49**), présente une tendance descendante avec un enregistrement de forte descente durant les périodes 1884-1892, 1923-1925, 1966-1985 et 2005-2011. L'allure de l'ajustement polynomiale présente une tendance générale diminuante avec une stabilité depuis 1966 à environ 2500µm.

L'analyse de la variance à un facteur et au seuil de signification de 99% à travers les différentes périodes d'années (**Tab. 16**) est significatif ; ce résultat explique la grande variabilité l'épaisseur moyenne des cernes avec un nombre important de faible épaisseur moyenne de cerne depuis environ 1966.

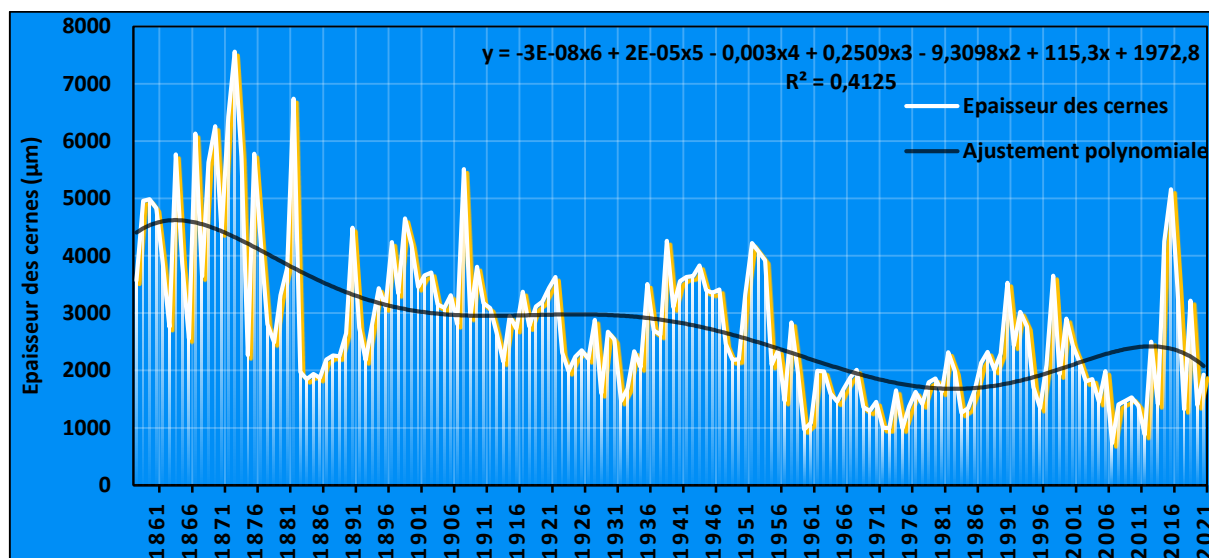


Figure 49. Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 07)

Tableau 16. Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l'épaisseur moyenne des cernes et l'évolution chronologique, station 07

Source des variations	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	150462013,79	5	30092402,75	13,47	7,95E-12	3,08
A l'intérieur des groupes	650087083,17	291	2233976,23			
Total	800549096,96	296				

- Station 08 :** La schématisation de l'épaisseur moyenne des cernes pour cette station, s'étalant sur une durée de 462 ans (Fig. 50), présente une tendance descendante avec un enregistrement de descente durant la période 1697-1967 suivi par une descente remarquable durant la période 1978-1985. L'allure de l'ajustement polynomiale présente une tendance générale diminuante avec une faible augmentation depuis 1967.

L'application de l'analyse de la variance à un facteur et au seuil de signification de 99% à travers les différentes périodes d'années (Tab.17) est significatif ; ce résultat explique la grande variabilité l'épaisseur moyenne des cernes.

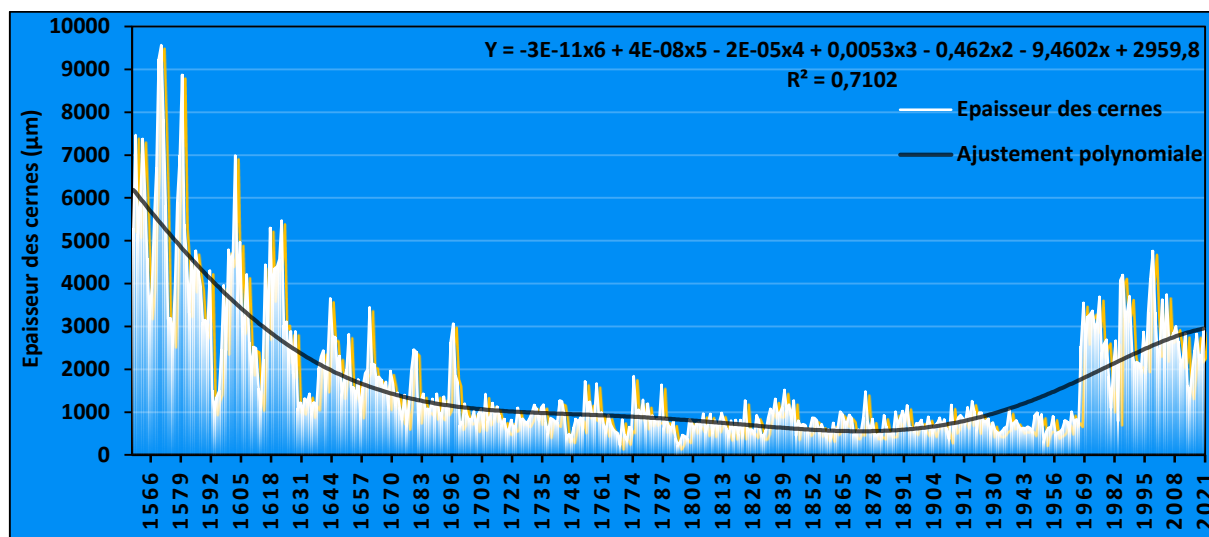


Figure 50. Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 08)

Tableau 17. Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l'épaisseur moyenne des cernes et l'évolution chronologique, station 08

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Degré de liberté</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Valeur critique pour F</i>
<i>Entre Groupes</i>	814899714,16	15	54326647,61	35,09	2,26E-68	2,07
<i>A l'intérieur des groupes</i>	775608953,92	501	1548121,66			
<i>Total</i>	1590508668,08	516				

- **Station 09 :** La schématisation de l'épaisseur moyenne des cernes pour cette station, s'étalant sur une durée de 353 ans (Fig. 51), présente une tendance descendante avec un enregistrement de descente durant la période 1796-1811, 1846-1855, 1920-1926, 1938-1945 et 1983-1992 suivi par une augmentation. L'allure de l'ajustement polynomiale présente une tendance générale diminuante jusqu'à 1993 où l'allure présente une augmentation à 1800µm.

L'application de l'analyse de la variance à un facteur et au seuil de signification de 99% à travers les différentes périodes d'années (Tab. 18) est significatif ce qui explique qu'il y a une variabilité entre les épaisseurs moyennes des cernes.

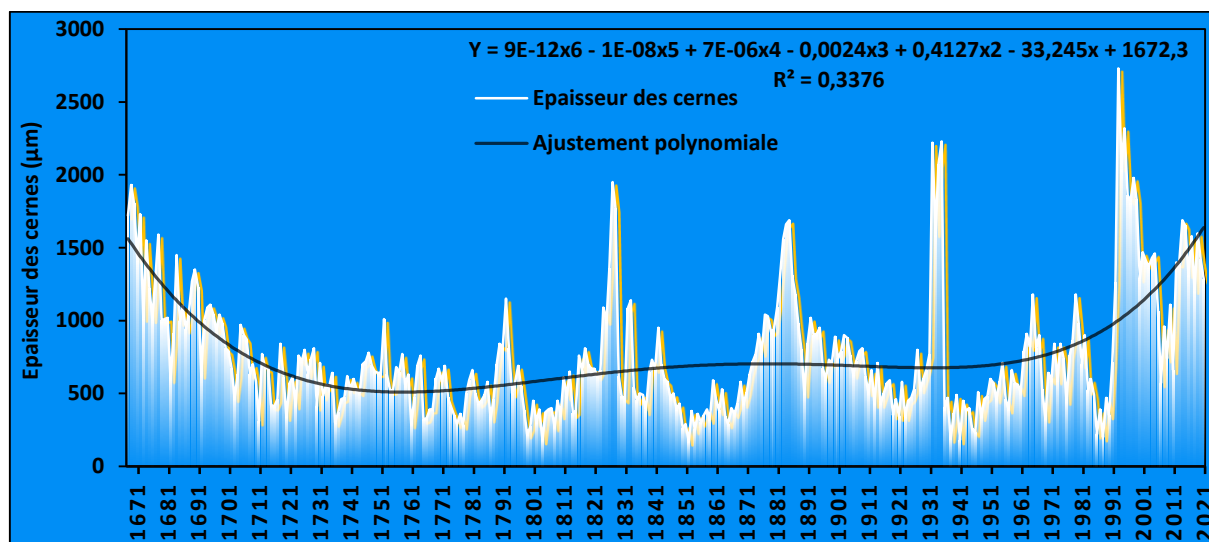


Figure 51. Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 09)

Tableau 18. Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l'épaisseur moyenne des cernes et l'évolution chronologique, station 09

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Degré de liberté</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Valeur critique pour F</i>
<i>Entre Groupes</i>	30838950,66	11	2803540,96	29,43	3,10E-43	2,30
<i>A l'intérieur des groupes</i>	32573905,83	342	95245,33			
<i>Total</i>	63412856,49	353				

- Station 10 :** La figure 52 correspondante à la variabilité de l'épaisseur moyenne des cernes pour une durée de 126 ans, présente une tendance descendante avec un enregistrement de forte diminution durant les périodes 1940-1948, 1970-1988 et 2001-2006 suivi par une légère augmentation. L'allure de l'ajustement polynomiale présente, dans l'ensemble, une tendance diminuante jusqu'à 2006 où l'allure présente une stabilité à 2100µm.

L'application de l'analyse de la variance à un facteur et au seuil de signification de 99% à travers les différentes périodes d'années (Tab. 19) est significatif, un résultat confirmant l'allure générale de l'ajustement polynomiale.

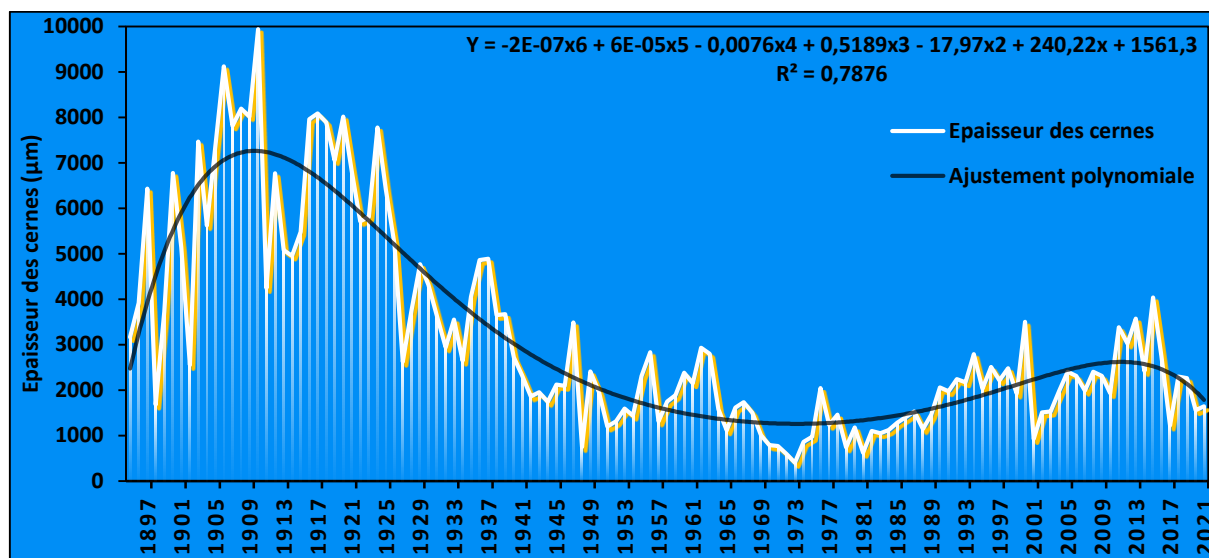


Figure 52. Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 10)

Tableau 19. Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l'épaisseur moyenne des cernes et l'évolution chronologique, station 10

Source des variations	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	439549776,99	4	109887444,2	74,06	1,01E-31	4,48
A l'intérieur des groupes	181009021,42	122	1483680,50			
Total	620558798,42	126				

- **Station 11** : La figure 53 correspondante à la variabilité de l'épaisseur moyenne des cernes pour une durée de 222 ans, présente clairement un déclin dans l'épaisseur des cernes avec un enregistrement de forte diminution durant les périodes 1876-1879, 1923-1926, 1960-1985 et 2004-2013. La tendance l'ajustement polynomiale est, dans l'ensemble, régressive. Le tableau 20 correspondant à l'application de l'analyse de la variance à un facteur et au seuil de signification de 99% à travers les différentes périodes d'années est hautement significatif, un résultat confirmant la variabilité de l'allure générale de l'ajustement polynomiale.

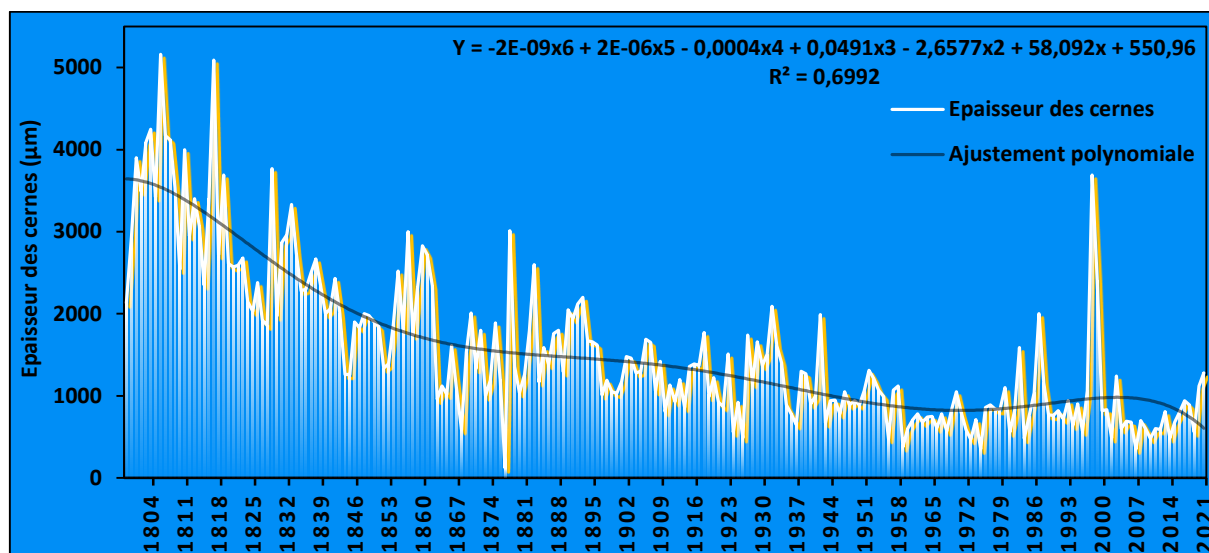


Figure 53. Courbe dendrochronologique avec ajustement polynomiale (station 11)

Tableau 20. Analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% entre l'épaisseur moyenne des cernes et l'évolution chronologique, station 11

Source des variations	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	131301406,48	7	18757343,78	56,50	2,41E-45	2,72
A l'intérieur des groupes	71374476,92	215	331974,31			
Total	202675883,40	222				

L'analyse dendrochronologique est un outil puissant pour étudier l'histoire de la croissance des arbres. Elle peut être utilisée pour déterminer l'âge d'un objet en bois, mais aussi pour comprendre les conditions climatiques et les événements historiques ayant eu lieu pendant la croissance de l'arbre. Lors de l'analyse dendrochronologique, nous examinons les cernes de croissance annuels de l'arbre pour déterminer son âge. Ils peuvent également utiliser des modèles mathématiques pour simuler la croissance de l'arbre et pour mieux comprendre les facteurs qui ont influencé sa croissance ;

Les résultats de l'analyse dendrochronologique peuvent être comparés à d'autres sources de données pour obtenir une image complète de l'histoire climatique et environnementale de notre région du massif de l'ouersnis. Par exemple, les données dendrochronologiques peuvent être combinées à des données historiques et climatiques pour mieux comprendre les impacts du changement climatique sur les forêts de Ain anter et theniet elhad. En résumé, la synthèse de l'analyse dendrochronologique montre que cet outil est utile pour comprendre les conditions



climatiques et les événements historiques ayant eu lieu pendant la croissance des arbres, ainsi que pour déterminer l'âge des objets.

L'ensemble des stations présentent des épaisseurs de cernes moyennes nettement variables d'une année à l'autre reflétant ainsi la variabilité climatique sur une durée allant de 130 à 350 ans, où dans l'ensemble l'allure des cernes dévoilent un déclin remarquable entre les siècles précédents et ce dernier, d'ailleurs les fluctuations des épaisseurs de cernes est beaucoup plus importantes ce dernier siècle comparé aux précédents.

Dans l'ensemble les périodes les plus défavorables sont celles des années 1936 à 1938 et 1979 à 1985 où l'ensembles des stations démontrent une grande diminution dans l'épaisseur des cernes.

D'une autre part, le service forestier du parc national de Theniet El Had dénombra trois mille arbres morts sur pieds au courant du mois de novembre de l'année 1984 (**Zedek, 1993**). Face à cette situation et à la complexité du processus de dépérissement, le climat, décrit par l'épaisseur moyenne des cernes, serait un acteur principal dans le processus de dépérissement du fait que le dépérissement est signalé dans une période connue par des conditions climatiques défavorables (épaisseurs des cernes réduites) sur l'ensemble des stations.

Dès lors, et en se basant sur les résultats obtenus lors de l'étude de la relation entre le dépérissement et les paramètres dendrométrique qui accuse l'espacement entre les tiges et l'apparition d'un nombre important d'arbre dépéris durant une période sèche serait à l'origine du dépérissement.

### **6.3. Synthèse de l'analyse cartographique de l'état des peuplements du cèdre**

L'objectif de cette dernière partie est d'analyser l'état de recouvrement des cédraies de Theniet el Had et d'Ain Antar sur une période de 35 ans à l'aide du système d'information géographique suivi par une analyse de la relation climat superficie. Pour cela, il est décidé d'utiliser l'indice de végétation (*Normalized Difference Vegetation Index*) pour classer les différentes espèces des cédraies.

Les images satellitaires sont prises sur une durée de 35 ans à partir de 1985 à raison d'une image pour chaque 5 ans dans une période où les nuages sont très faibles voir totalement absentes. Au total 16 images ont été traitées (8 pour la cédraie de Theniet el Had, et 8 pour la cédraie d'Ain Antar).

### 6.3.1. L'indice de végétation NDVI

**Tucker (1979)** explique le NDVI comme un indice de végétation sans dimension utilisé à l'aide des données multi spectrales de télédétection pour le suivi de la végétation. Il s'agit de saisir l'intensité de l'activité chlorophyllienne de la canopée permettant ainsi, la quantification de la biomasse végétale produite selon la formule suivante (**Huete et al., 2002**).

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R} \quad \text{avec :}$$

PIR = La réflectance dans le proche infrarouge,

R = La réflectance dans le rouge

Plusieurs sont les applications du NDVI, citons en exemple estimation de la déforestation, suivi des feux de forêts, évaluer l'ampleur de la désertification et des dégâts causés par les insectes (**Jepsen et al., 2009**).

La valeur du NDVI est comprise entre  $-1$  et  $+1$  où les valeurs négatives expriment des surfaces non végétées (neige, eau, etc.), les sols nus comprennent une valeur proche de 0. Quant aux formations végétales, la valeur du NDVI est comprise entre 0,1 et 0,7.

#### 6.3.1.1. La cédraie de Theniet El Had

- *NDVI du 15/06/1985*

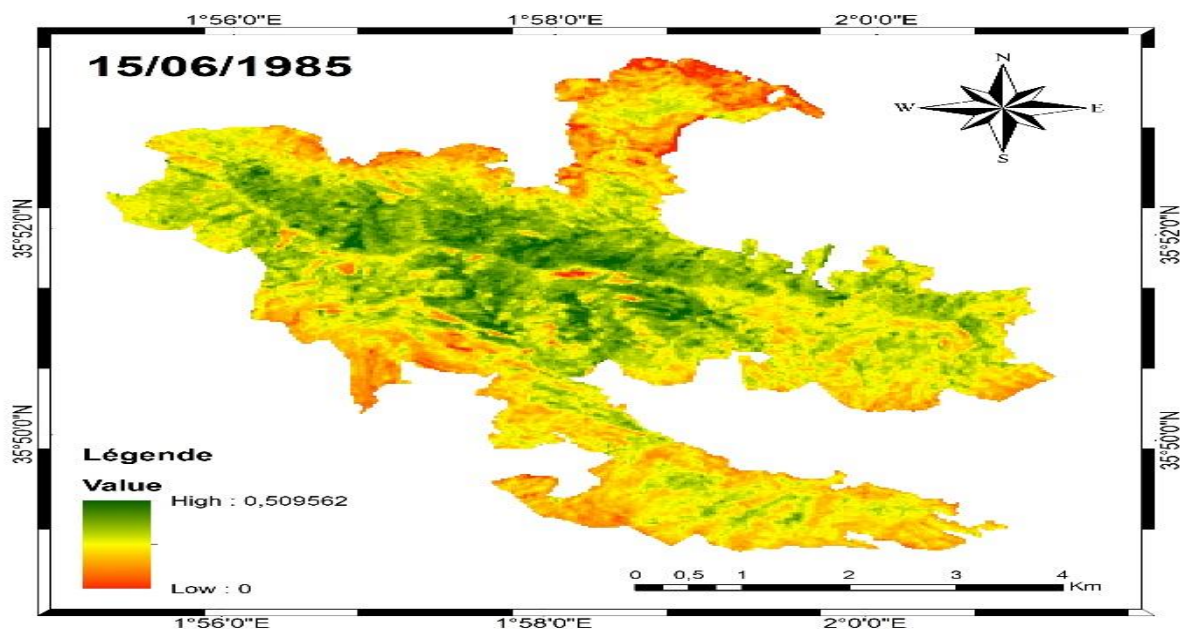
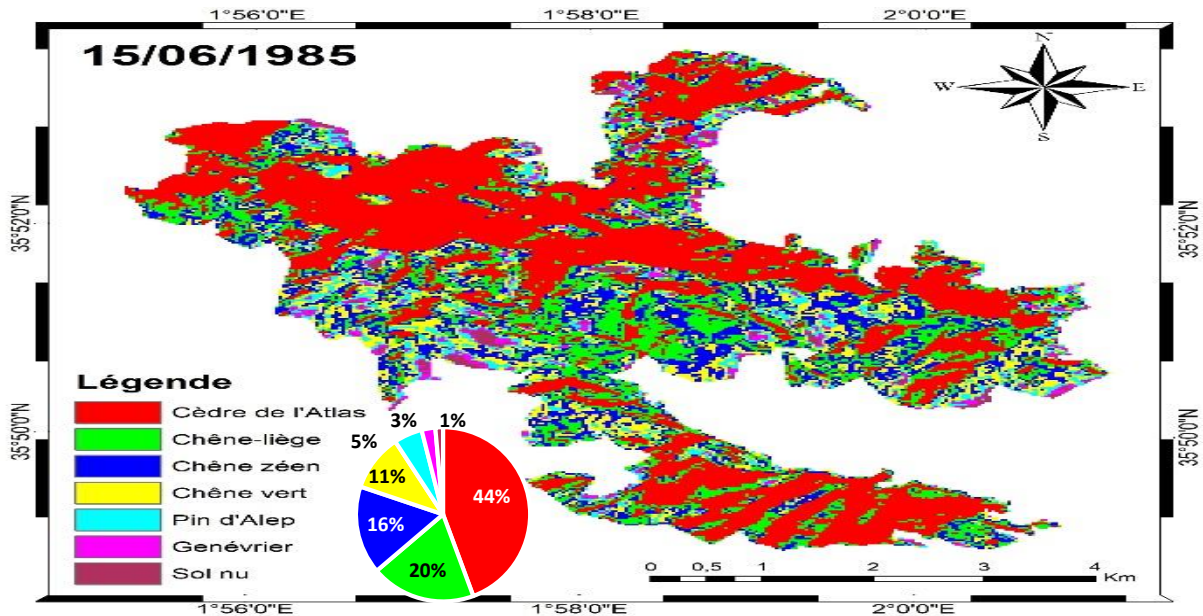


Figure 54. Indice de végétation de Theniet El Had (1985)

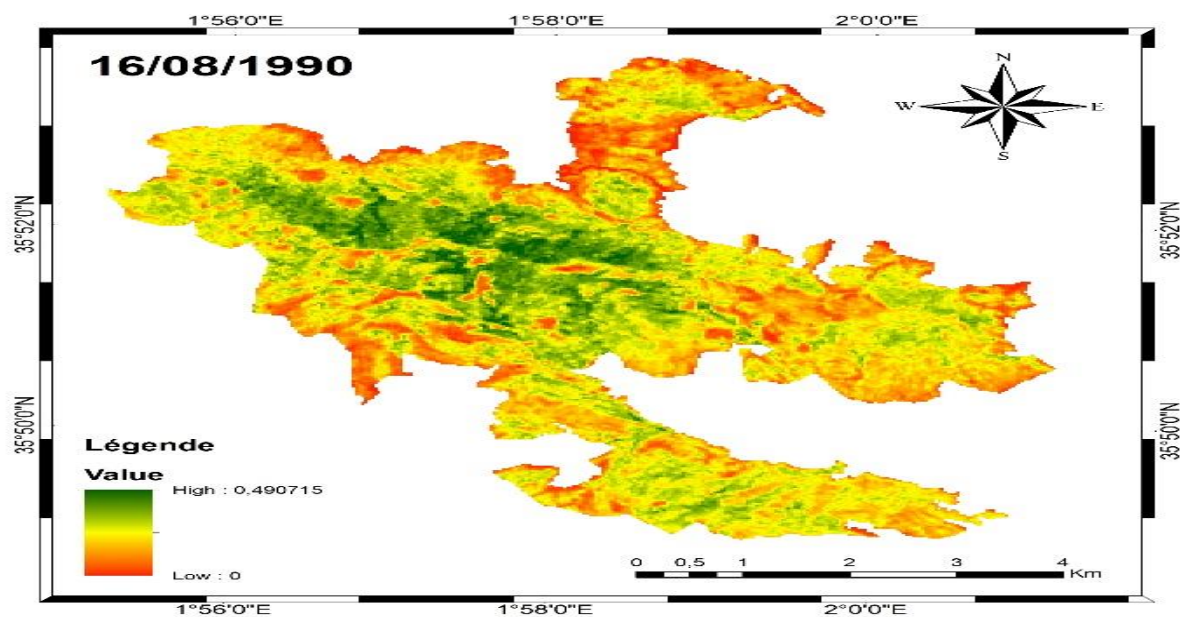
La **figure 54** correspondant à l'indice de végétation du parc national de Theniet el had varie entre 0 et 0,51, l'interprétation de l'activité chlorophyllienne démontre que le cèdre de l'Atlas est l'espèce la plus dominante avec une superficie d'environ 16000 ha soit 44% de la superficie totale du parc (**Fig. 55**).



**Figure 55. Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (1985)**

▪ **NDVI du 16/08/1990**

La **figure 56** correspondant à l'indice de végétation du parc national de Theniet el had varie entre 0 et 0,49, l'interprétation de l'activité chlorophyllienne démontre que la superficie du cèdre de l'Atlas a diminué d'une manière importante remplacée par le chêne vert et le chêne zen tout en passant d'un taux de recouvrement de 44% à 38% (**Fig. 57**).



**Figure 56. Indice de végétation de Theniet El Had (1990)**

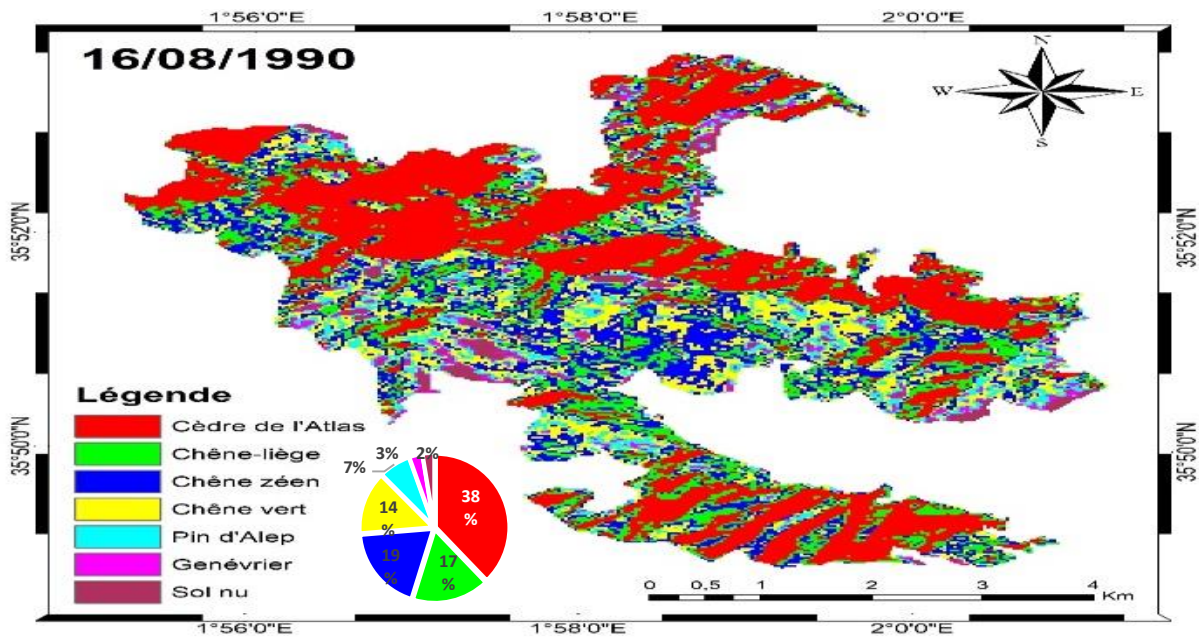


Figure 57. Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (1990)

▪ *NDVI du 30/08/1995*

La **figure 58** correspondant à l'indice de végétation du parc national de Theniet El had varie entre 0 et 0,40 indiquant une diminution dans la valeur maximale de 0,10, l'interprétation de l'activité chlorophyllienne démontre que la superficie du cèdre de l'Atlas a augmenté de 6% tout en passant d'un taux de recouvrement de 38% à 46% remplaçant ainsi le chêne vert (**Fig. 59**). Cela est dû essentiellement à la grandeur du cèdre de l'Atlas qui lui donne une dominance assez importante par rapport au chêne vert

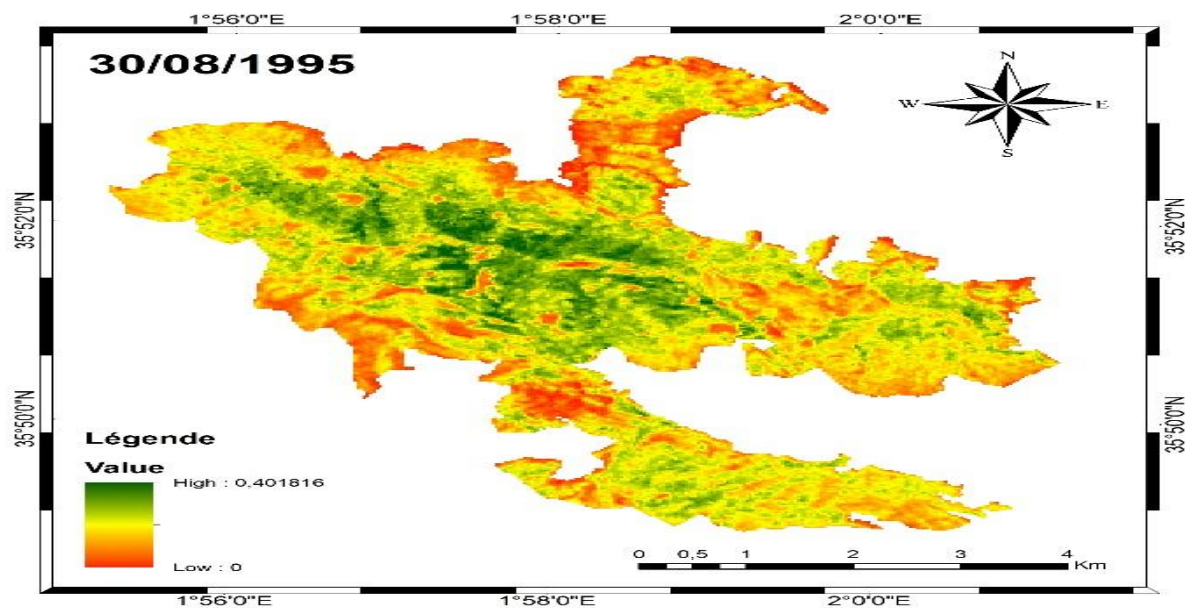
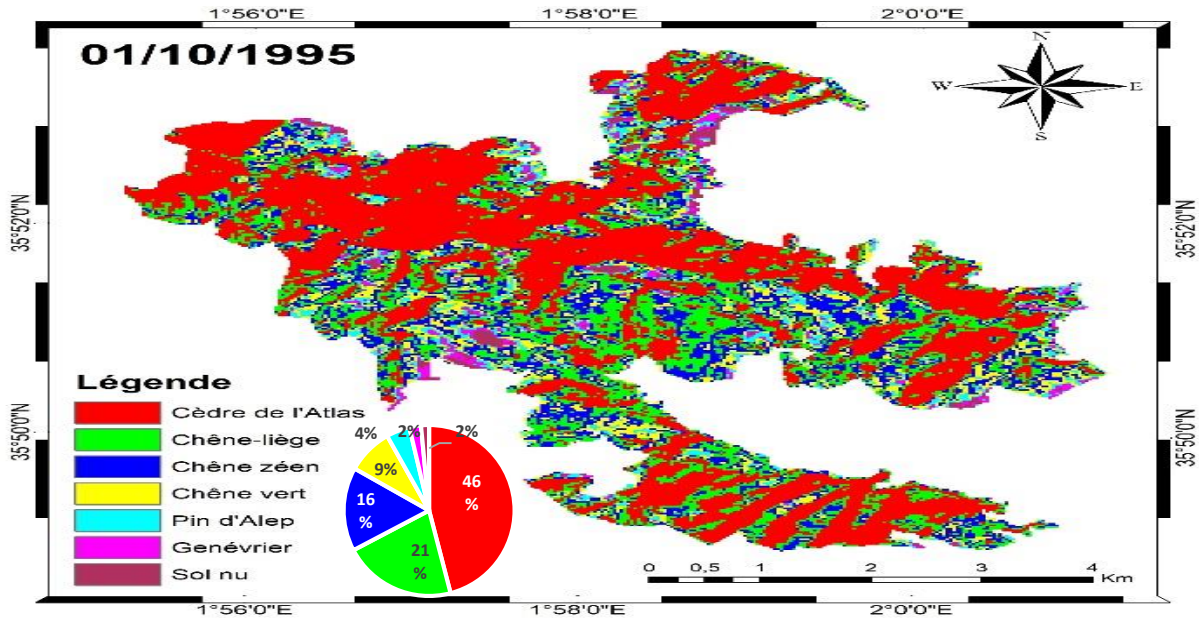


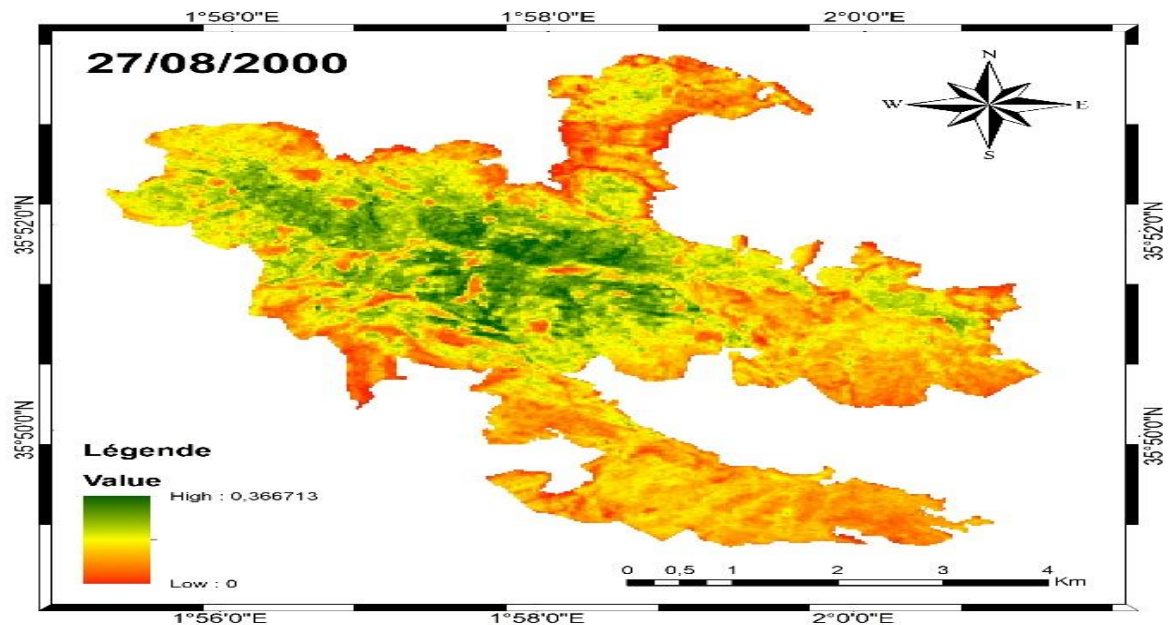
Figure 58. Indice de végétation de Theniet El Had (1995)



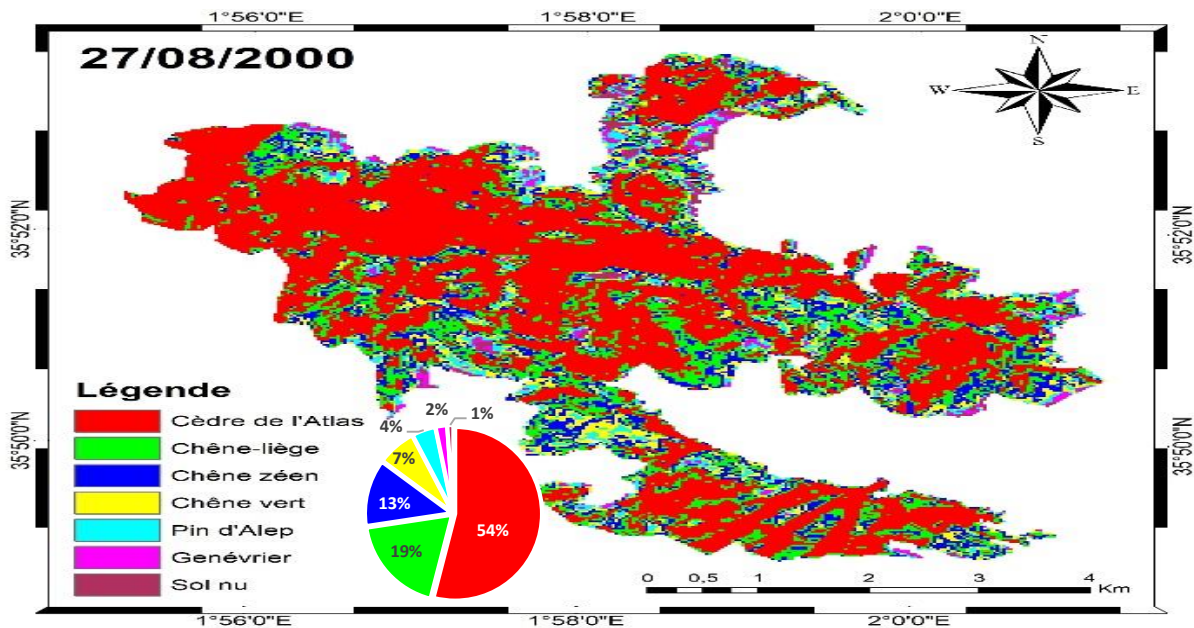
**Figure 59. Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (1995)**

▪ *NDVI du 27/08/2000*

La **figure 60** correspondant à l'indice de végétation du parc national de Theniet el had varie entre 0 et 0,37, l'interprétation de l'activité chlorophyllienne démontre que la superficie du cèdre de l'Atlas a augmentée d'une manière importante diminué d'une manière importante prenant la place du chêne vert et du chêne zen tout en passant d'un taux de recouvrement de 46% à 56% (**Fig. 61**).



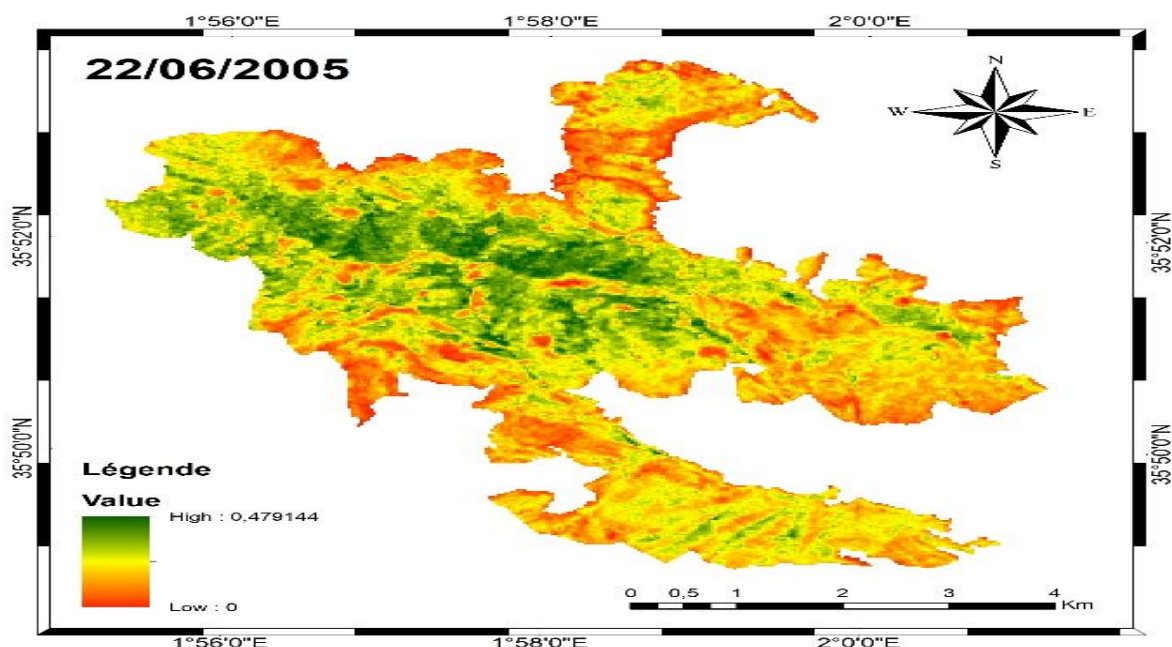
**Figure 60. Indice de végétation de Theniet El Had (2000)**



**Figure 61. Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (2000)**

▪ **NDVI du 22/06/2005**

La **figure 62** correspondant à l'indice de végétation du parc national de Theniet El Had varie entre 0 et 0,47, une situation indiquant une amélioration de 0,10 par rapport à celui de l'année 2000 ; l'interprétation de l'activité chlorophyllienne démontre que la superficie du cèdre de l'Atlas est d'une manière générale stable, le taux de recouvrement a passé de 54% à 55% (**Fig. 63**).



**Figure 62. Indice de végétation de Theniet El Had (2005)**

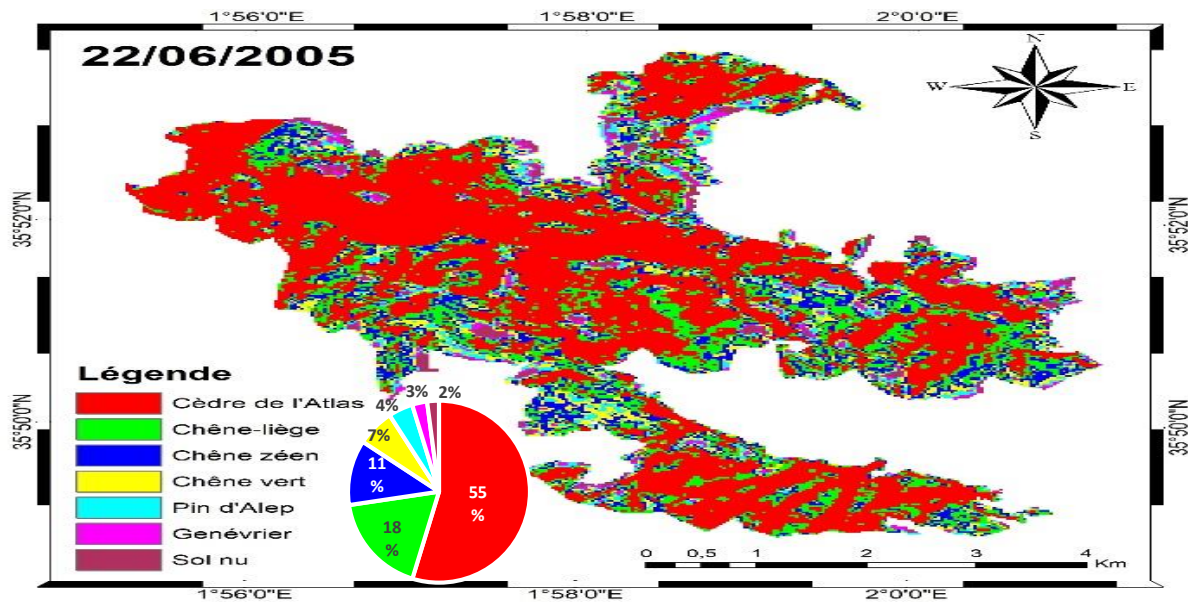


Figure 63. Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (2005)

▪ *NDVI du 07/08/2010*

La **figure 64** correspondant à l'indice de végétation du parc national de Theniet El Had varie entre 0 et 0,44, une situation indiquant une légère diminution de 0,03 par rapport à celui de l'année 2005 ; l'interprétation de l'activité chlorophyllienne démontre que la superficie du cèdre de l'Atlas a connu une importante diminution, le taux de recouvrement a passé de 55% à 38% (**Fig.65**).

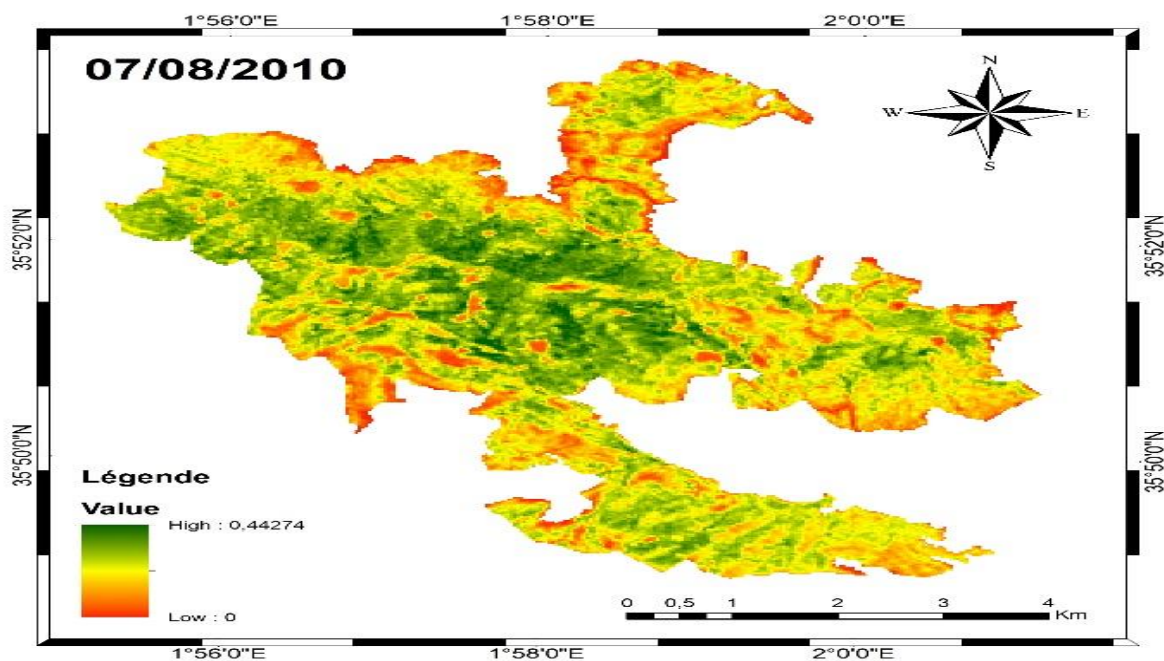


Figure 64. Indice de végétation de Theniet El Had (2010)

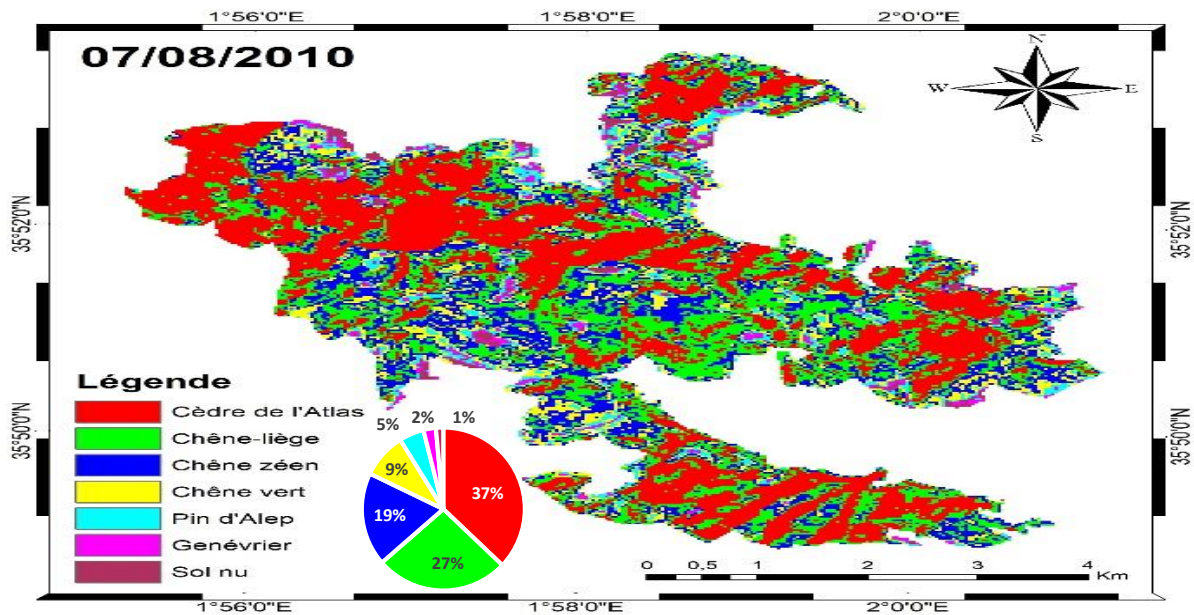


Figure 65. Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (2010)

▪ *NDVI du 22/09/2015*

La **figure 66** correspondant à l'indice de végétation du parc national de Theniet el had varie entre 0 et 0,56, une situation indiquant une augmentation importante de 0,12 par rapport à celui de l'année 2010 ; l'activité chlorophyllienne démontre que la superficie du cèdre de l'Atlas a connu une importante augmentation, le taux de recouvrement a passé de 38% à 60% (**Fig.67**).

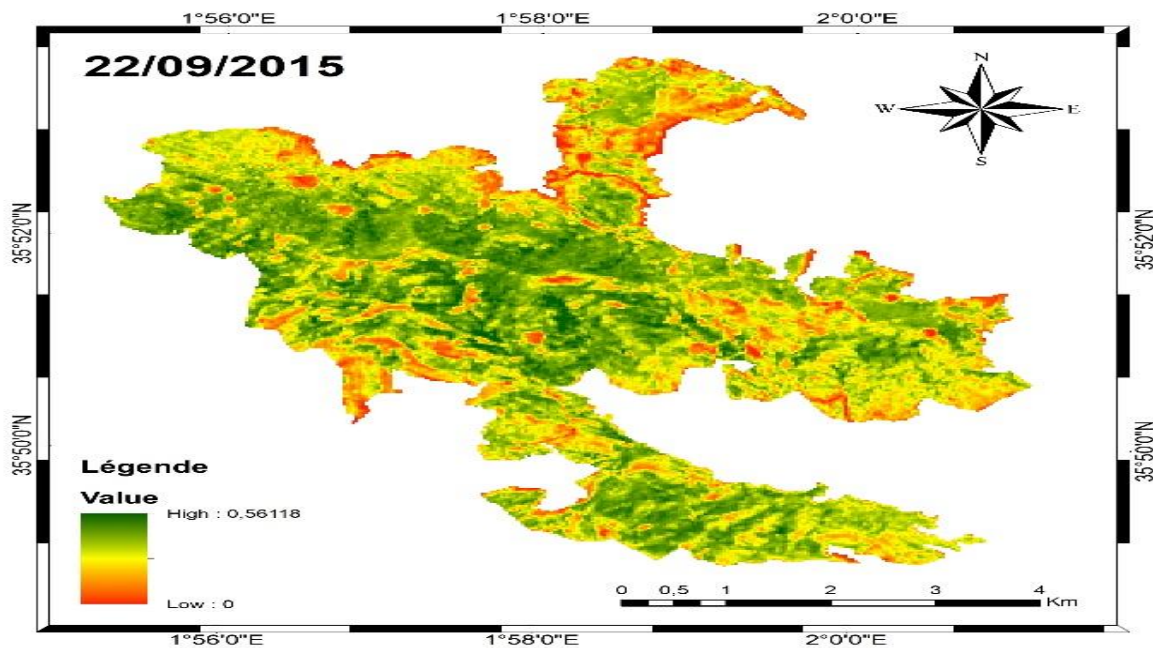


Figure 66. Indice de végétation de Theniet El Had (2015)



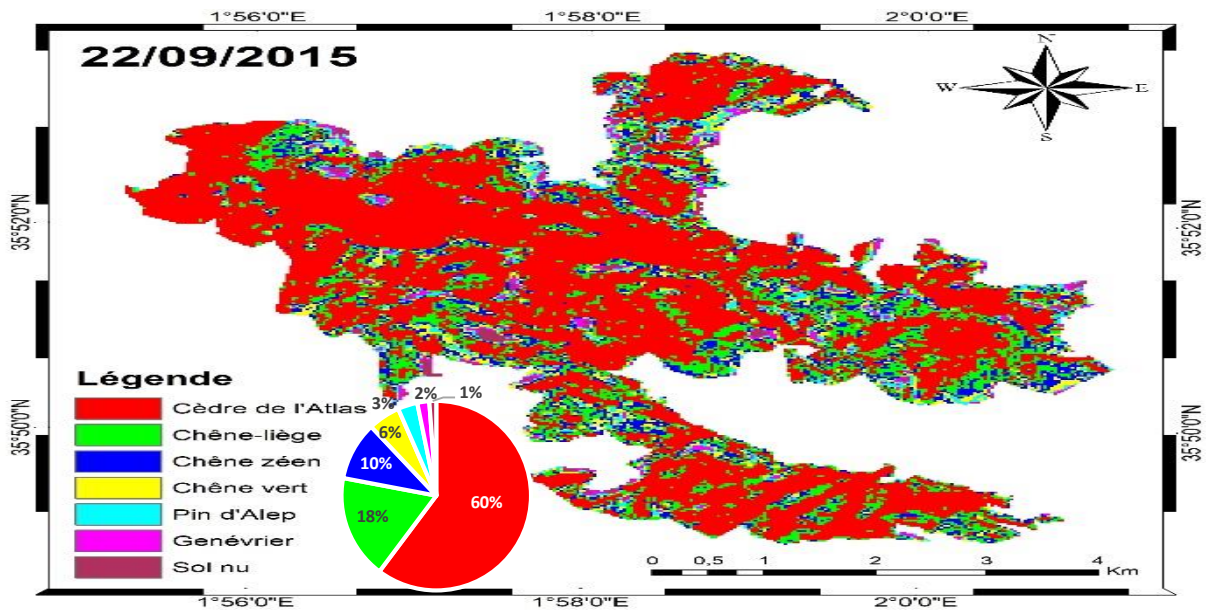


Figure 67. Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (2015)

▪ *NDVI du 22/09/2020*

Quoique l'indice de végétation n'a pas connu un changement important (de 0,56 en 2015 à 0,51 en 2020) (**Fig. 68**) il est à signaler que le taux de recouvrement du cèdre de l'Atlas a connu une importante diminution où il a passé de 60% en 2015 à 44% en 2020 (**Fig. 89**).

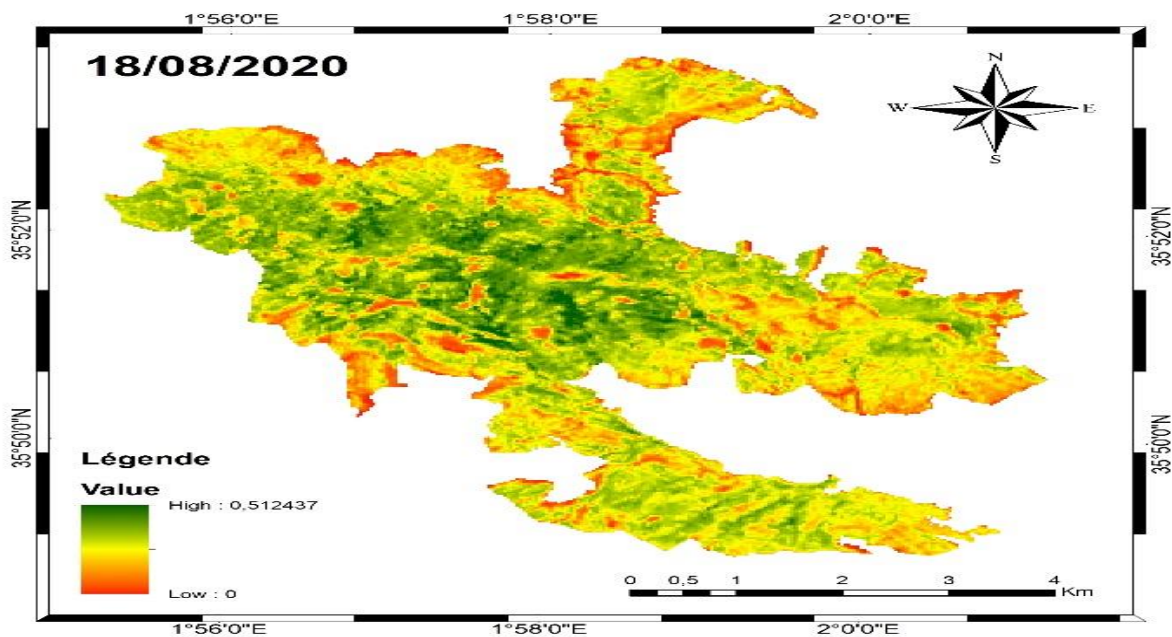
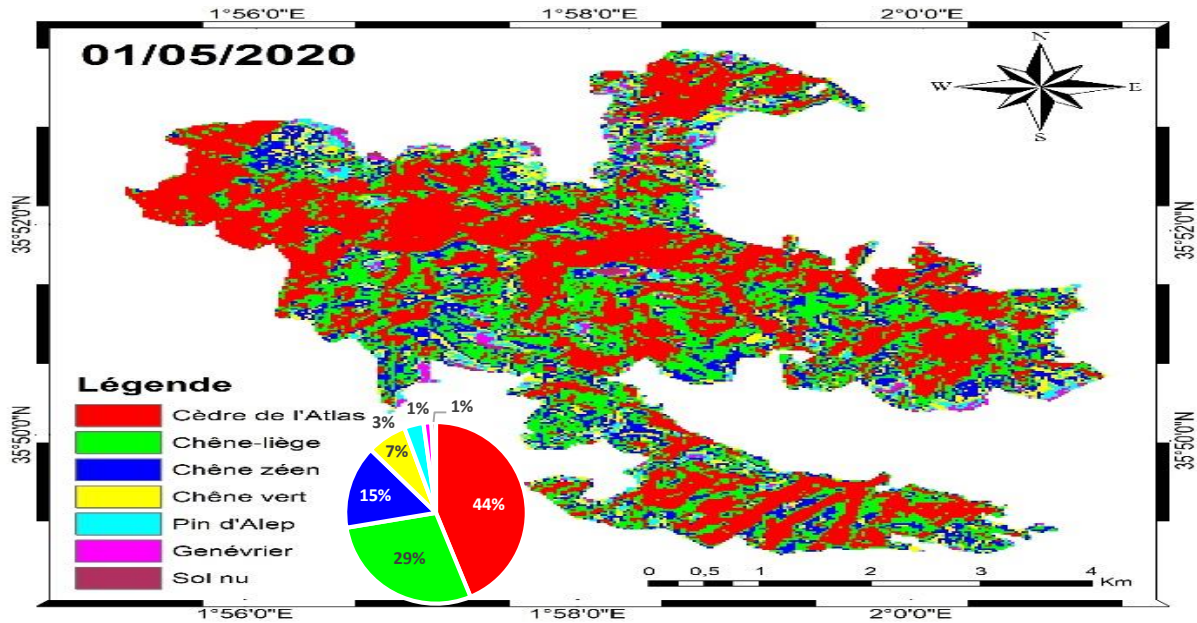
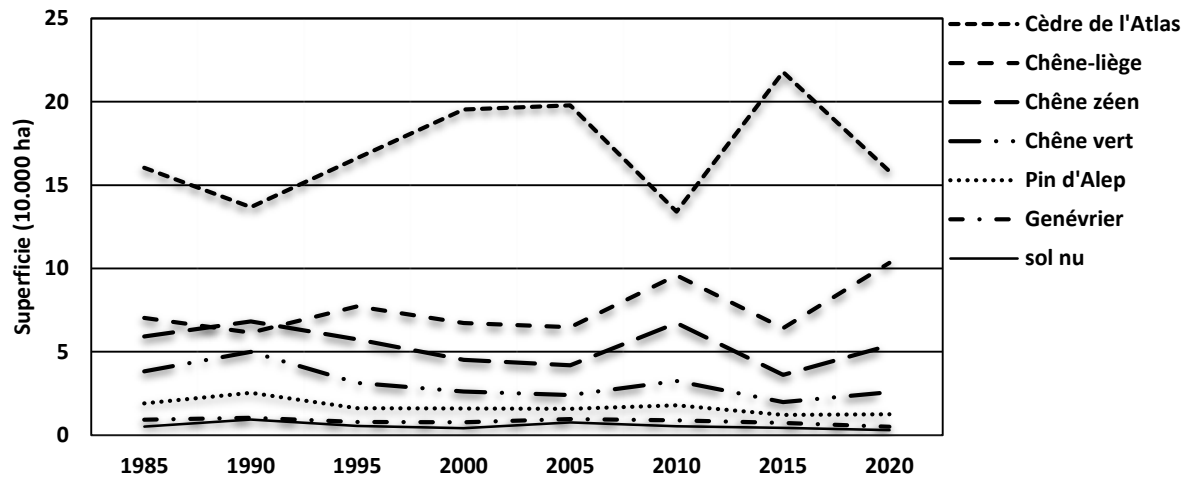


Figure 68. Indice de végétation de Theniet El Had (2020)



**Figure 69. Occupation forestière par espèce du parc de Theniet El Had (2020)**

A partir de la **figure 70**, il est à remarquer que le cèdre de l'Atlas, quoiqu'il sa subi une variabilité importante pendent ces dernières décennies, il en demeure l'espèce dominante dans le parc national de Theniet el Had ; cette situation revient en premier lieu à la grandeur du cèdre de l'Atlas (c'est l'espèce la plus élancée en hauteur) par conséquent, vue de ciel, son recouvrement exclus celui des autres espèces. Chronologiquement parlant, la superficie du cèdre a pris une augmentation entre 1985 et 2020, cela revient au fait que le climat a connu dès l'année 1985 une amélioration. D'ailleurs l'ensemble des stations d'étude dendrochronologique démontre une amélioration dans l'épaisseur des cernes moyennes annuelles indiquant, ainsi, une amélioration des conditions climatiques ; de plus, les travaux d'assainissement des arbres morts sur pieds du cèdre de l'Atlas de l'année 1984 ont raffiné l'espace vital des cèdres du fait que l'espacement présente une relation directe avec le dépérissement tel qu'il a été attesté dans la relation dépérissement-caractères dendrométriques.



**Figure 70.** Evolution par espèce des superficies forestières du parc de Theniet El Had (85-20)

### 6.3.1.2. La cédraie d'Ain Antar

#### ▪ NDVI du 15/06/1985

L'indice de végétation pour cette année est faible comparé à celui de Theniet El Had (varie entre 0 et 0.33) indiquant une activité chlorophyllienne faible (**Fig. 71**). Ce qui est remarquable, en utilisant la classification des espèces, c'est la supériorité en matière de surface du chêne vert par rapport au cèdre de l'Atlas avec un taux de 38% à 31% (**Fig. 72**).

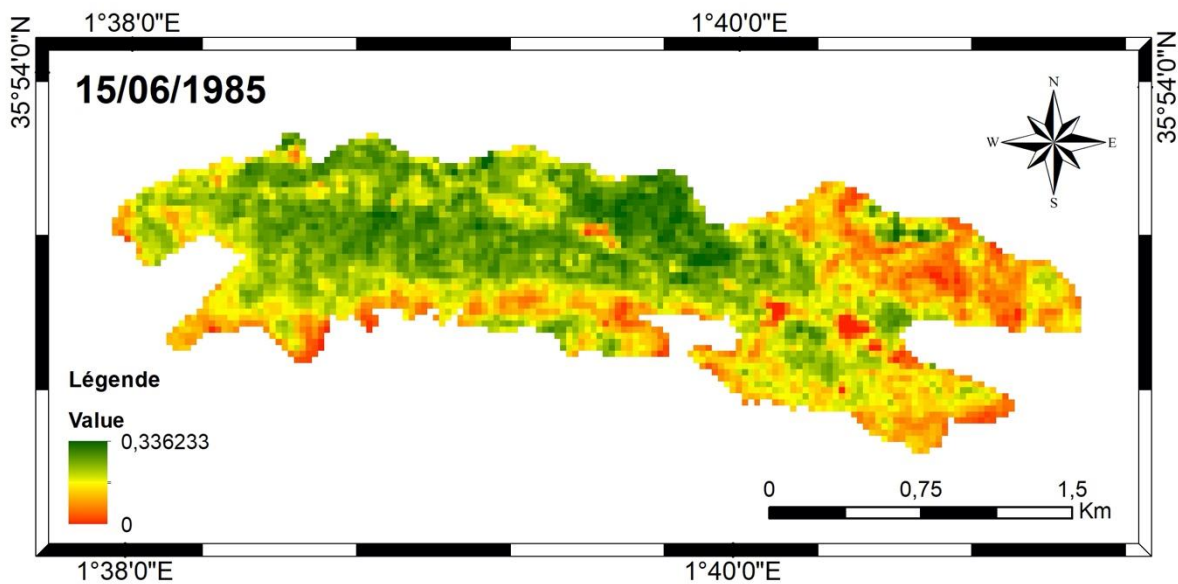


Figure 71. Indice de végétation d'Ain Antar (1985)

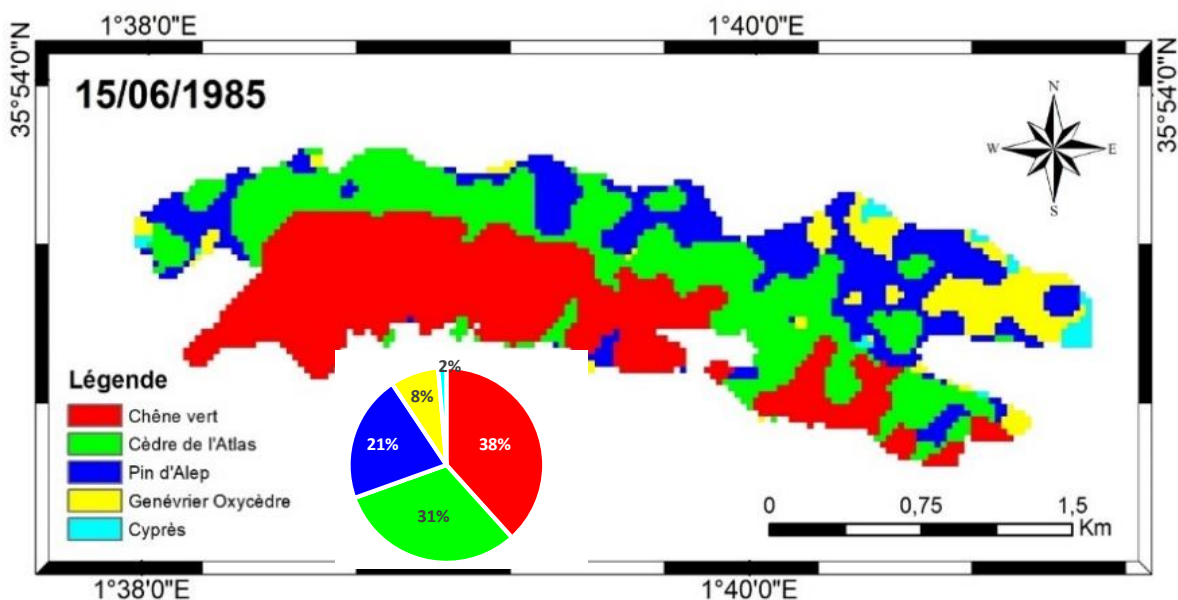
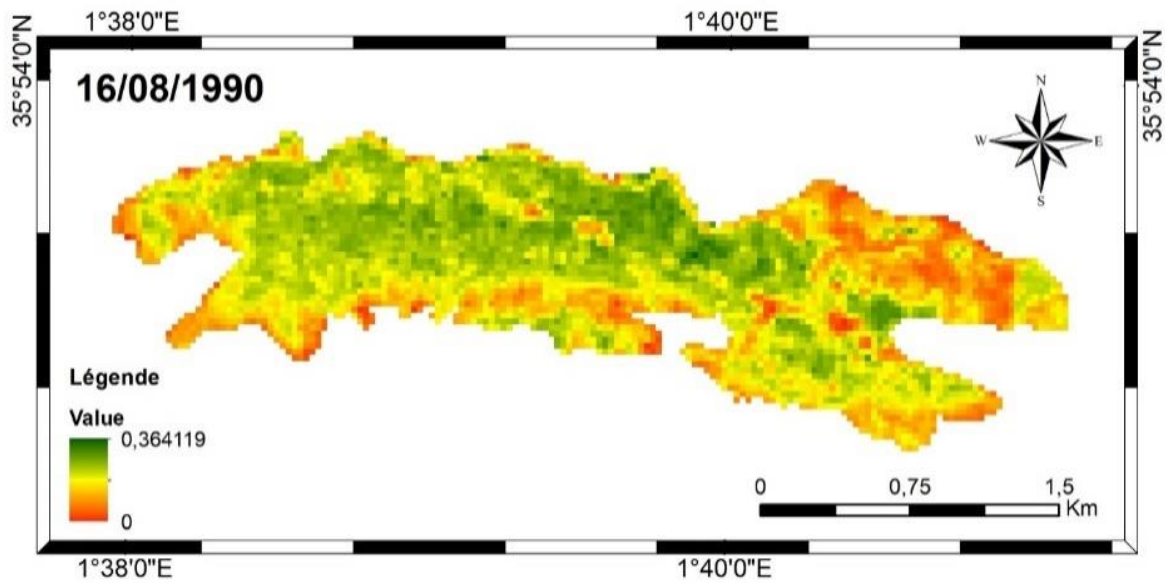


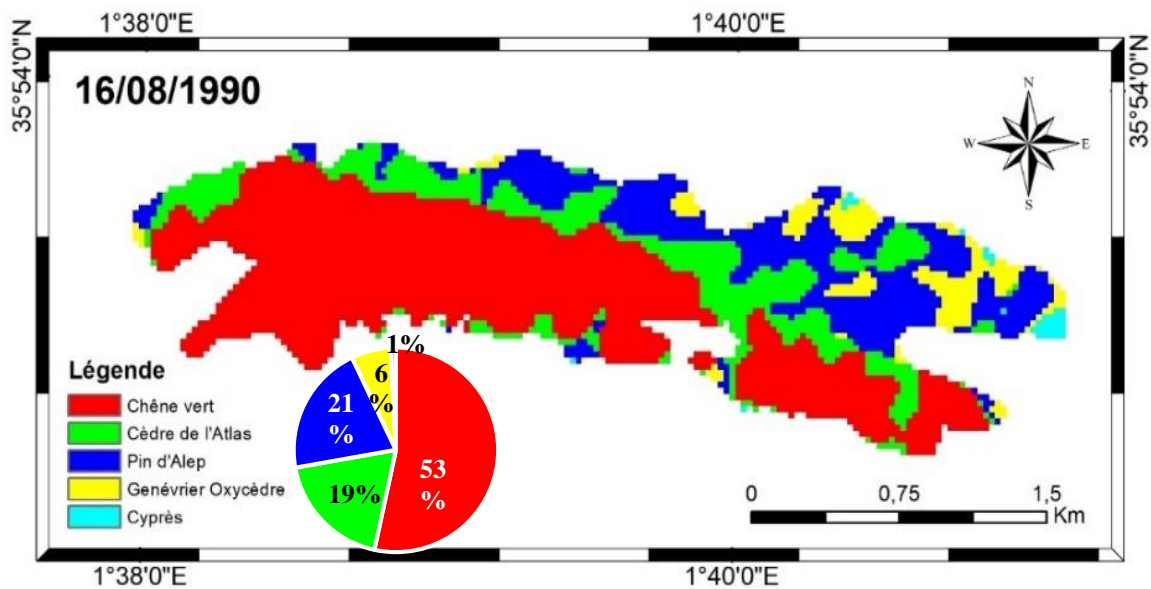
Figure 72. Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (1985)

- *NDVI du 16/08/1990*



**Figure 73. Indice de végétation d'Ain Antar (1990)**

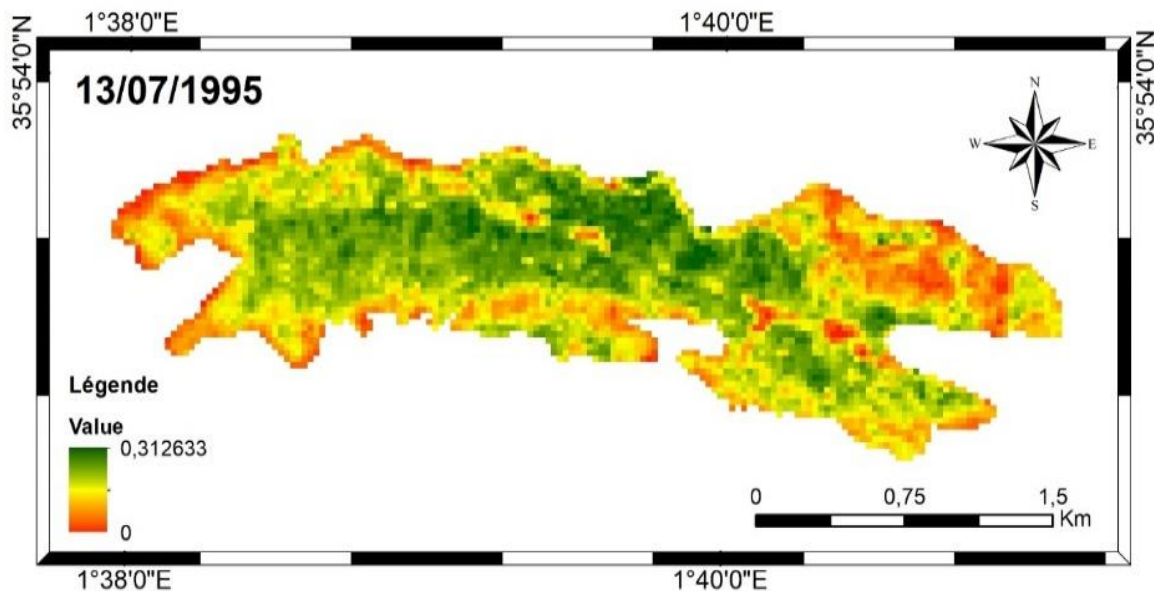
La **figure73** correspondant à l'indice de végétation d'Ain Antar varie entre 0 et 0,36 indiquant, ainsi, une certaine stabilité par rapport à l'année 1985. L'interprétation de l'activité chlorophyllienne démontre que le taux du cèdre de l'Atlas a clairement diminué en laissant la place au chêne vert (**Fig. 74**)



**Figure 74. Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (1990)**

▪ *NDVI du 13/07/1995*

L'activité chlorophyllienne dans cette année représente toujours une stabilité en la confrontant à la décennie précédente (**Fig. 75**). La catégorisation des espèces montre une légère amélioration du taux de recouvrement du cèdre de l'Atlas au détriment du chêne vert avec respectivement, 31% et 30% (**Fig. 76**)



.Figure 75. Indice de végétation d'Ain Antar (1995)

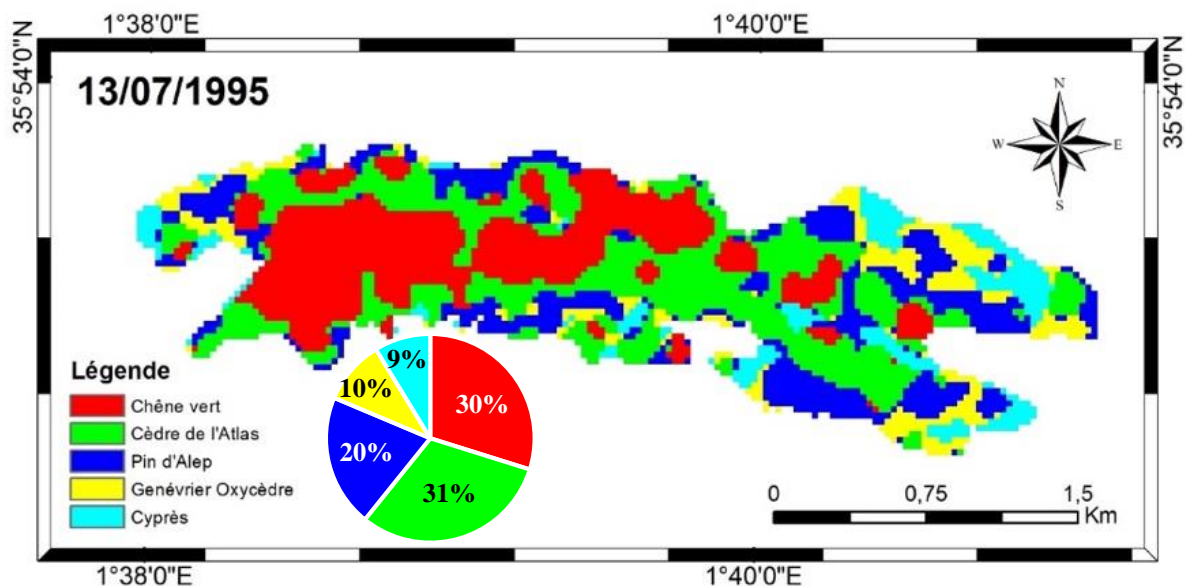
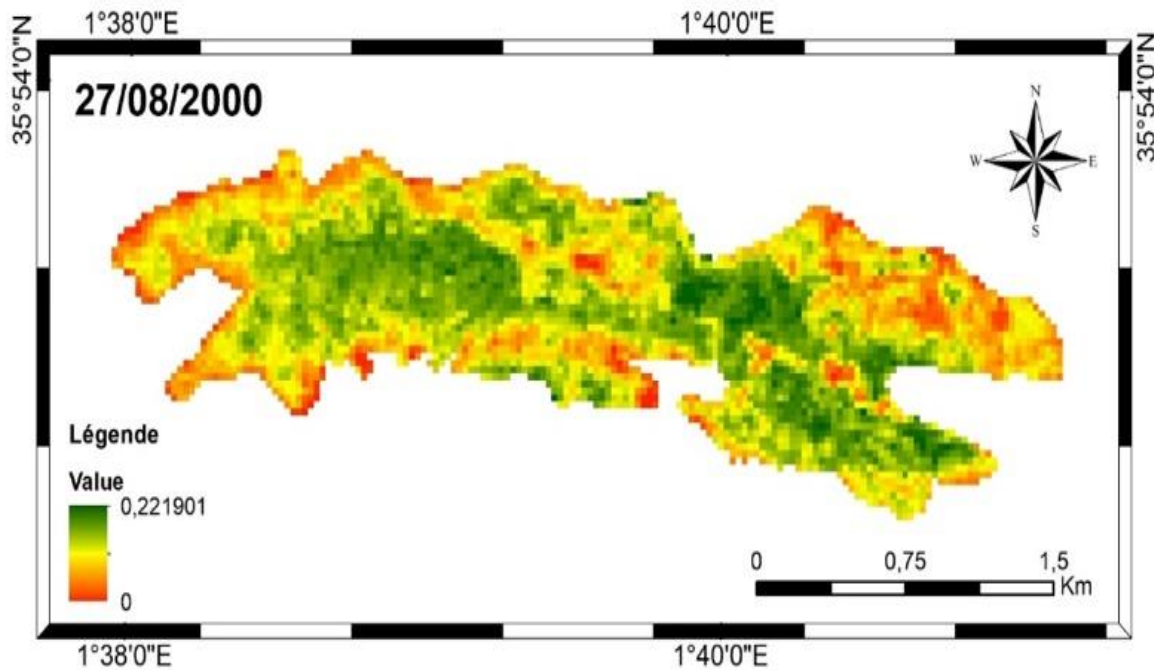


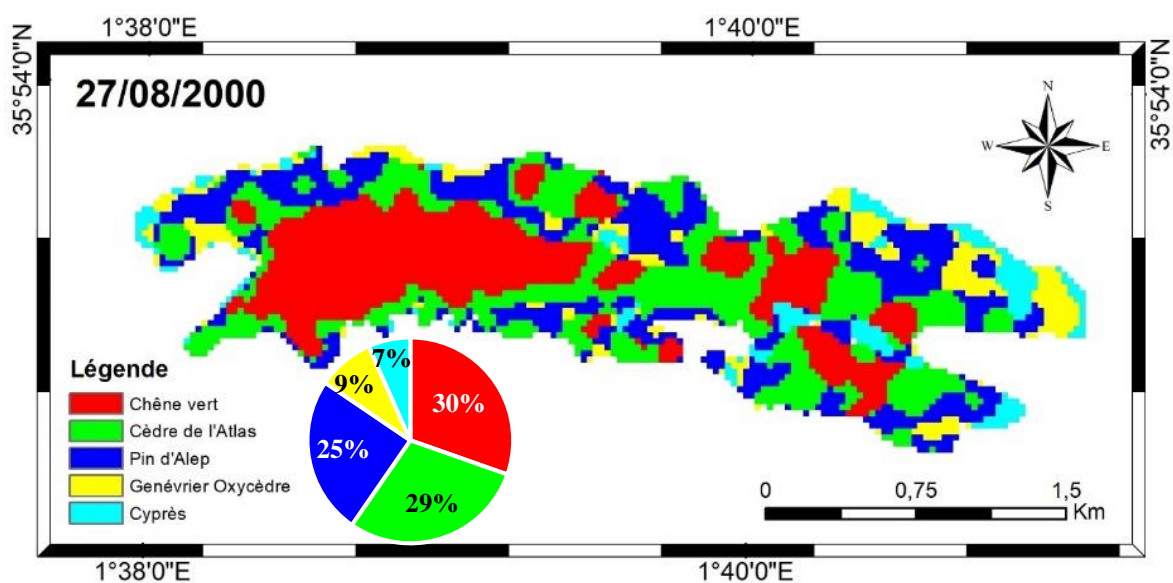
Figure 76. Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (1995)

▪ *NDVI du 27/08/2000*

L'activité chlorophyllienne indique une diminution (entre 0 et 0.22) or que cette image satellitaire est prise le mois d'août ce qui pourrait interpréter cette diminution (**Fig. 77**). La classification des espèces dans la **figure 78** illustre une concurrence entre le cèdre de l'Atlas et le chêne vert ainsi que le pin d'Alep qui prend une ampleur importante où il cohabite avec le cèdre de l'Atlas dans les hautes altitudes.



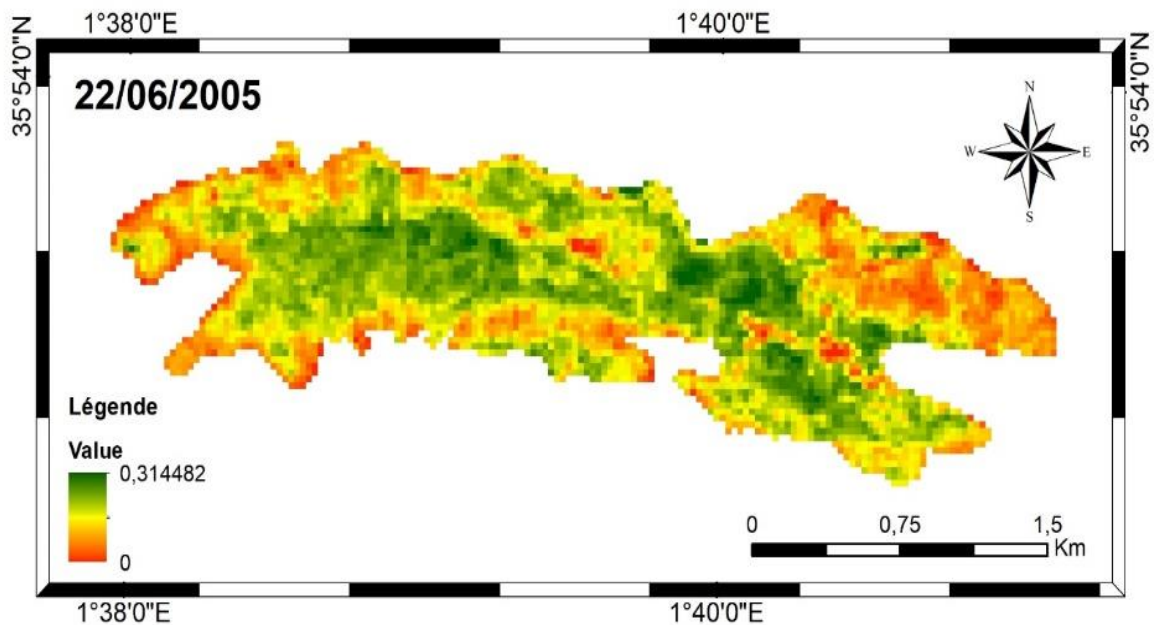
**Figure 77. Indice de végétation d'Ain Antar (2000)**



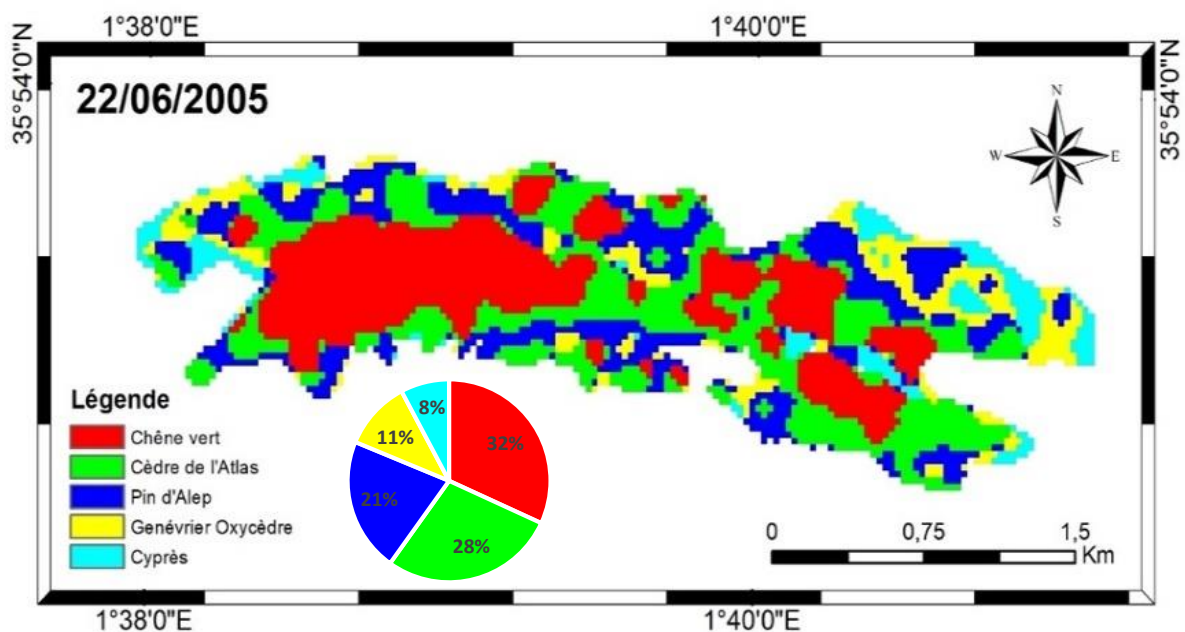
**Figure 78. Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (2000)**

▪ *NDVI du 22/06/2005*

La **figure 79** correspondant à l'indice de végétation varie entre 0 et 0,31, l'interprétation de l'activité chlorophyllienne démontre que le cèdre de l'Atlas régresse au profit du chêne vert et le pin d'Alep (**Fig. 80**).



**Figure 79. Indice de végétation d'Ain Antar (2005)**



**Figure 80. Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (2005)**



▪ *NDVI du 07/08/2010*

L'indice de végétation est toujours stable, variant entre 0 et 0.31 (**Fig. 81**). La classification des espèces dans la **figure 82** démontre une amélioration dans le taux du cèdre de l'Atlas d'un pourcentage de 9% par rapport à l'année 2005.

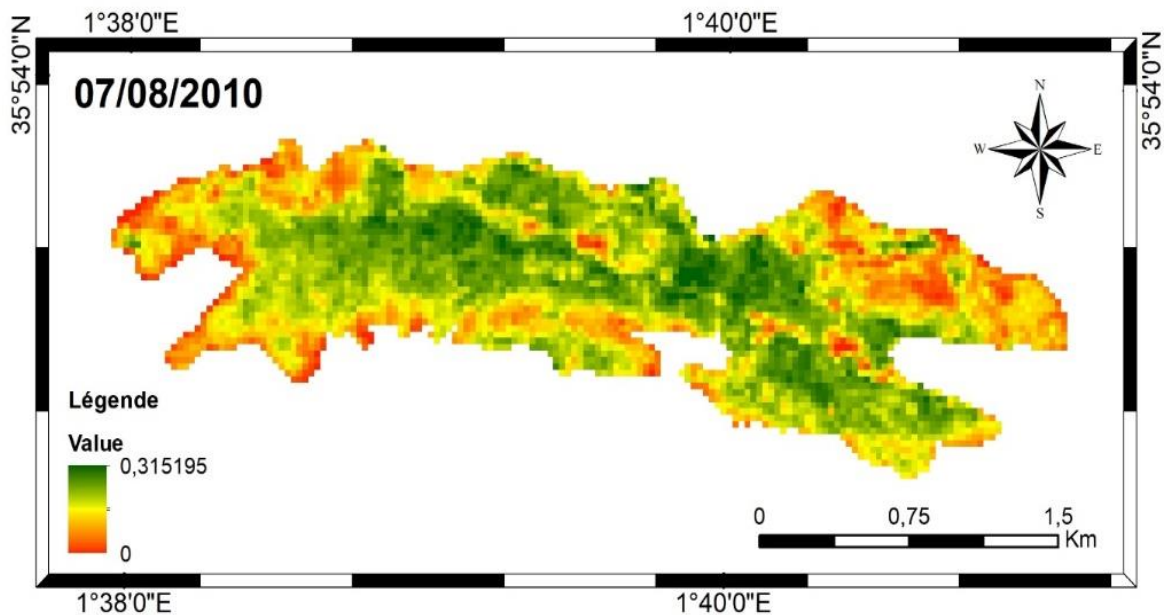


Figure 81. Indice de végétation d'Ain Antar (2010)

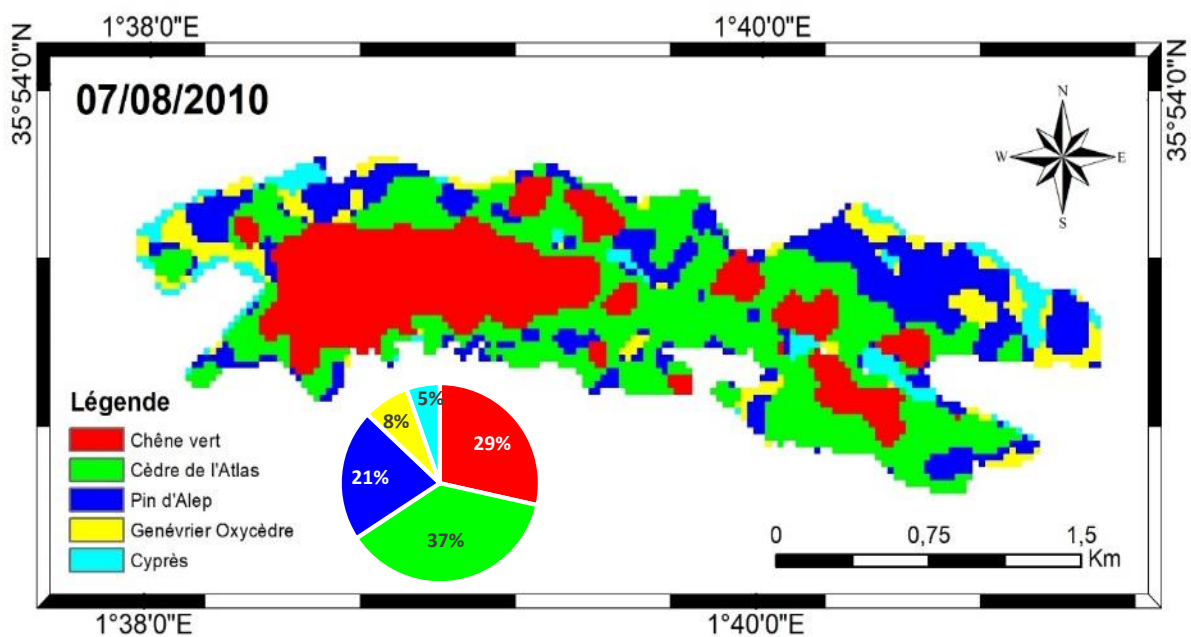
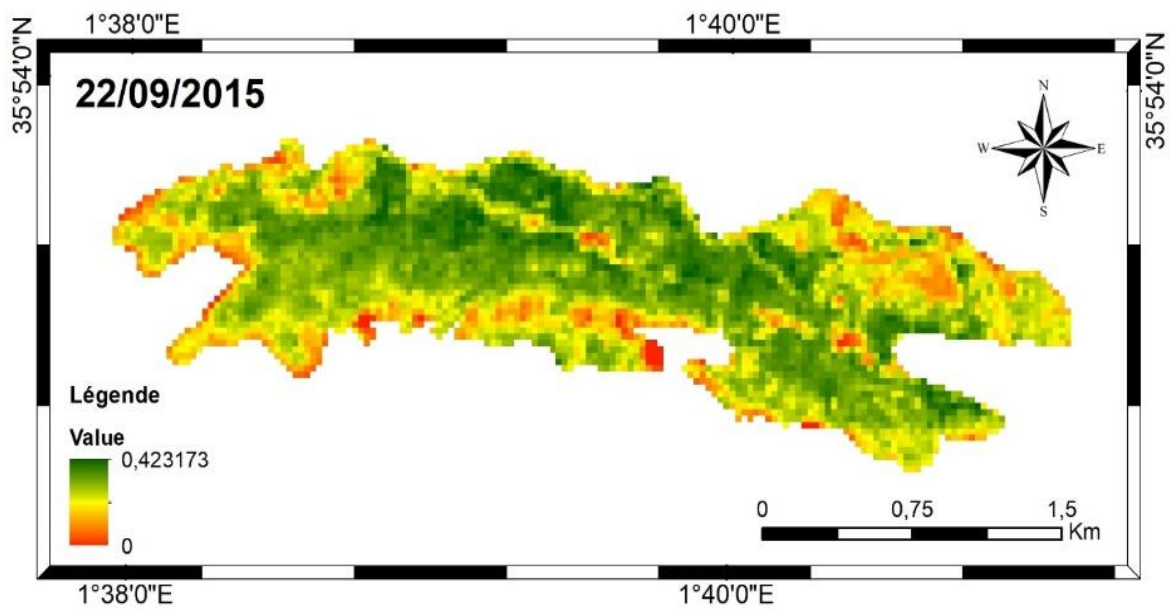


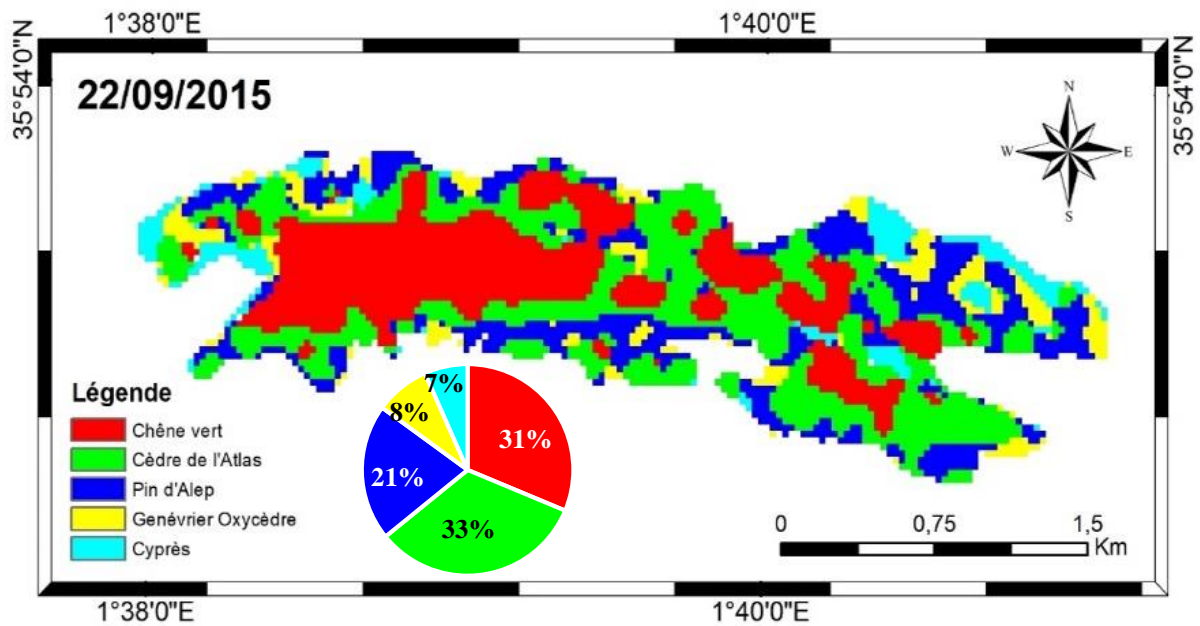
Figure 82. Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (2010)

▪ *NDVI du 22/09/2015*

La **figure 83** correspondant à l'indice de végétation varie entre 0 et 0,42 indiquant une augmentation, l'interprétation de l'activité chlorophyllienne démontre que le cèdre de l'Atlas est toujours en concurrence avec le pin d'Alep et le chêne vert avec une diminution dans son taux d'occupation (**Fig.84**).



**Figure 83. Indice de végétation d'Ain Antar (2015)**



**Figure 84. Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (2015)**

▪ *NDVI du 18/08/2020*

L'indice de végétation, à travers la figure 123, indique qu'il varie entre 0 et 0.37. L'interprétation de la classification des espèces montre que le cèdre de l'Atlas présente une légère augmentation le mettant dans la première position après le taux du chêne vert (**Fig. 85**).

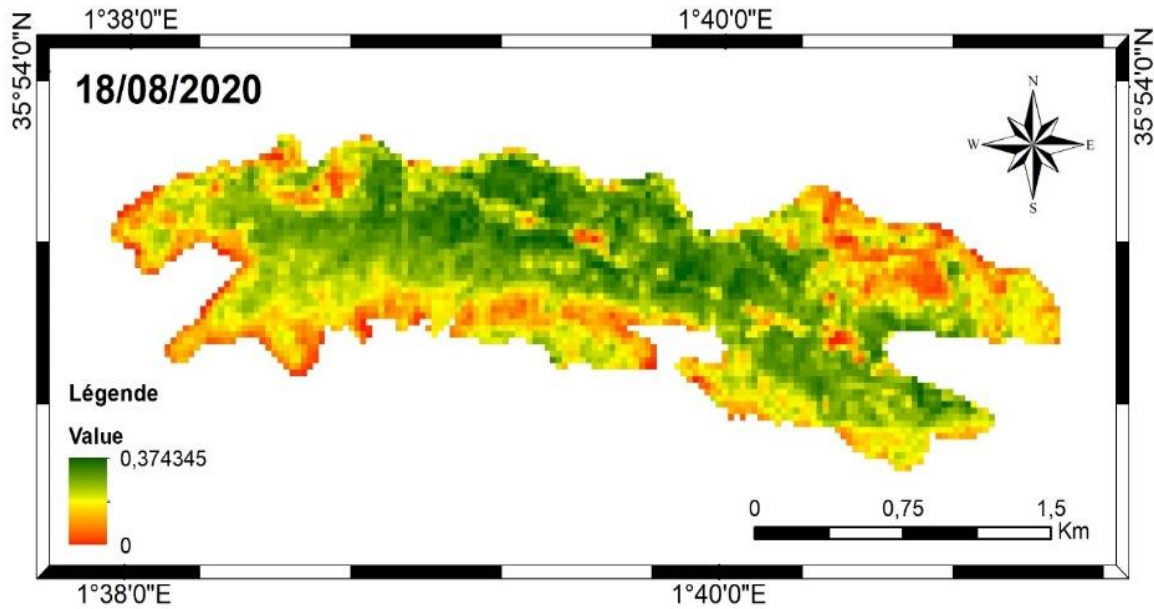


Figure 85. Indice de végétation d'Ain Antar (2020)

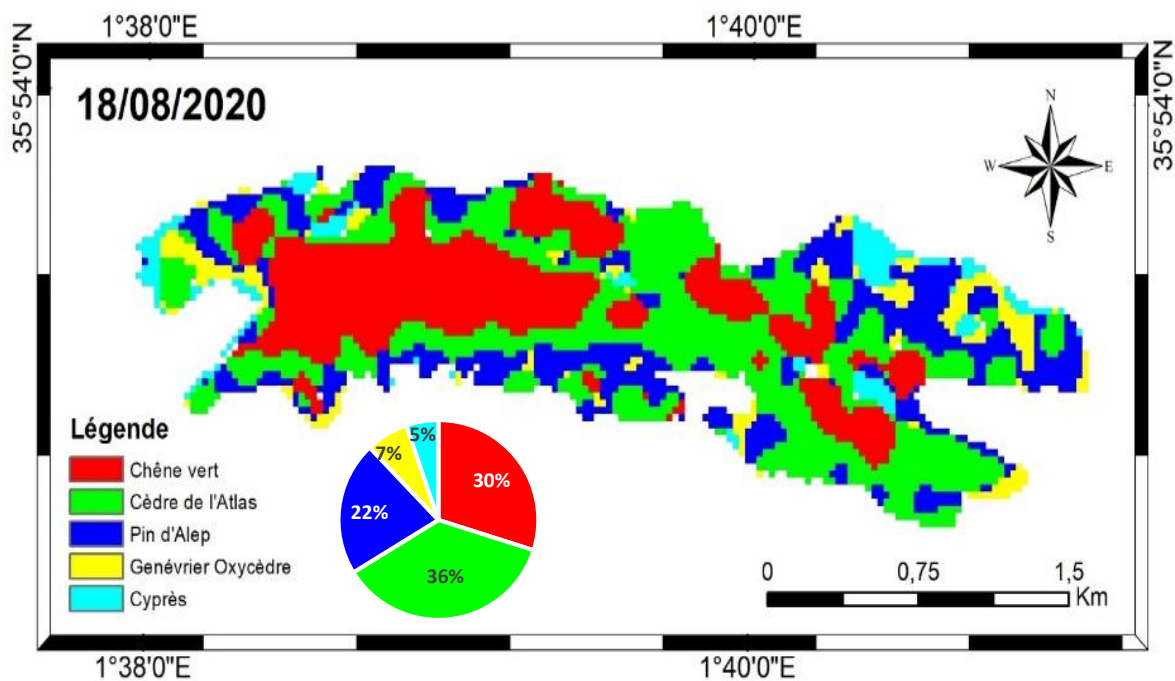
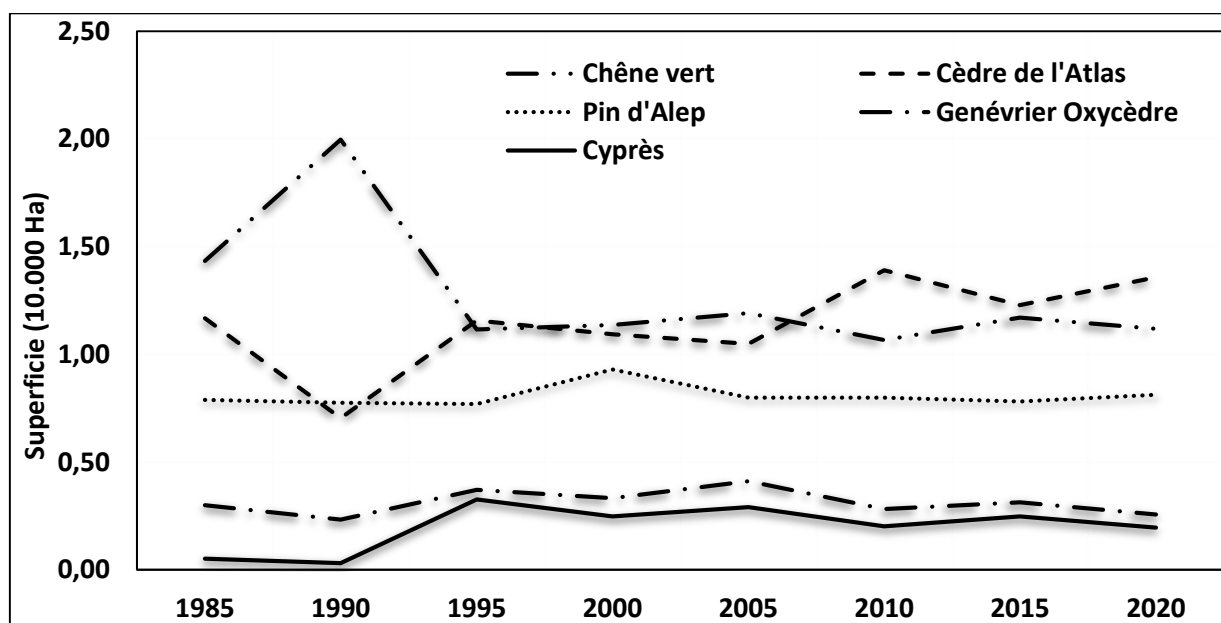


Figure 86. Occupation forestière par espèce du parc de Ain Antar (2020)

La **figure 87** correspondant à la variabilité des superficies des espèces dans la forêt d'Ain Antar montre une concurrence accrue entre le chêne vert et le cèdre de l'Atlas, une situation inquiétante pour la pérennité du cèdre de l'Atlas, il s'agit, en fait, d'un changement climatique favorisant l'installation du chêne vert qui présente des qualités avantageuses pour les climats secs jusqu'à 2005, suivi par une amélioration de la superficie du cèdre de l'Atlas le mettant comme espèce dominante. D'ailleurs l'étude dendrochronologiques provoque une diminution dans l'épaisseur moyenne des cernes indiquant des conditions climatiques défavorables durant les années 1985 à 2005 avec un ajustement polynomiale régressif suivi par une augmentation dans l'ajustement dès les années 2004-2010 ce qui explique le bon comportement du cèdre de l'Atlas.

Quoique l'explication suscitée provoque la relation taux du cèdre climat (expliqué par la dendrochronologie), il est impératif de signaler que le dépérissement est trop faiblement présent dans la cédraie d'Ain Antar par rapport à celle de Theniet el Had du fait que les conditions climatiques sont en générale plus propice dans l'exposition de la première que dans la deuxième.



**Figure 87.** Evolution par espèce des superficies forestières du parc de Ain Antar (85-20)

#### 6.4. Synthèse de l'analyse statistique

La réalisation de ce travail a fait l'objet d'une synthèse récapitulative montrant les éventuelles interactions relationnelles entre les différents paramètres constituant ce travail.

- L'analyse de la relation entre le dépérissement et les facteurs dendroécologiques, par le biais de l'analyse de la variance, démontre que le dépérissement est considérablement lié à la répartition des tiges de cèdre dans la mesure où ces forêts sont loin d'être soumis à un aménagement et par conséquent un espacement vital entre arbres.
- L'étude dendrochronologique sur les différentes stations objet du carottage, démontre que pour l'ensemble des stations, l'épaisseur des cernes est nettement variable d'une année à l'autre présentant ainsi l'ampleur de la variabilité climatique durant le siècle précédent avec, dans l'ensemble, une tendance régressive le long du siècle précédent avec une timide amélioration pendant les années 2000-2020. Un résultat intéressant dans la mesure où l'étude du NDVI présente une diminution suivie par une augmentation pour ces dernières années. Cette situation, quoiqu'attirante, elle demeure loin d'être un indice favorable éliminant le fléau du dépérissement. En comparant la station de Theniet El Had avec celle d'Ain Antar, il est à remarquer que la cédraie de Theniet El Had présente des cernes plus rétrécis que celles d'Ain Antar dû essentiellement à l'exposition nordique et à l'étagement altitudinal.
- Les résultats de l'utilisation du NDVI peut varier selon l'objectif de la recherche et la région étudiée, mais certains des résultats courants incluent :
  - Évaluation de la santé de cèdre d'atlas : le NDVI peut être utilisé pour évaluer la santé de la forêt de cèdre d'atlas en comparant les niveaux actuels de végétation aux niveaux précédents. Si les niveaux du NDVI sont bas, cela peut indiquer un dépérissement de la forêt de cèdre d'atlas
  - Surveillance des tendances climatiques : le NDVI peut être utilisé pour surveiller les tendances climatiques en comparant les niveaux actuels de végétation aux niveaux passés. Cela peut aider à comprendre les effets du changement climatique sur les écosystèmes forestiers.
  - Évaluation de la gestion forestière : en comparant les niveaux actuels de végétation avec les niveaux précédents, le NDVI peut être utilisé pour évaluer l'impact des pratiques forestières sur la couverture végétale.
  - Étude des variations saisonnières : le NDVI peut être utilisé pour étudier les variations saisonnières de la couverture végétale dans les forêts. Cela peut aider à comprendre les réponses des forêts aux différents facteurs climatiques.

L'utilisation du NDVI en combinaison avec la dendrochronologie peut fournir des informations précieuses sur les tendances et les variations de la couverture végétale dans les régions forestières.

- L'application des SIG dans les cédraies de Theniet El Had et Ain Antar démontre que dans l'ensemble la superficie du cèdre est quasiment stable. Un résultat reflétant nettement l'amélioration climatique conclue par l'étude dendrochronologique.

# Conclusion générale

## CONCLUSION GENERALE

Le massif de l'Ouarsenis, appartenant à la région des hauts plateaux, présente l'un des plus riches territoires en biodiversité. Grâce à sa vaste étendue, plus de 10 millions d'hectares, et sa variabilité altitudinale importante, il renferme des étages bioclimatiques allant de l'aride au sub-humide qui se localise essentiellement dans la forêt d'Ain Antar et Theniet El Had.

Quoiqu'il présente une diversité importante, il en demeure soumis à des contraintes d'ordre anthropiques et naturelles, parmi les contraintes naturelles les plus cruciales, le dépérissement qui touche agressivement la cédraie de Theniet El Had et d'une importance moindre celle de Ain Antar.

Les études réalisées dans ce travail ont porté sur la recherche des relations existantes entre le fléau du dépérissement et les caractéristiques éco-dendrométriques, analyse dendrochronologique des cernes pour une reconstitution climatique et, enfin, l'utilisation du système d'information géographique pour voir l'état précédent et actuel du cèdre de l'Atlas sur une durée de 35 ans.

La relation entre le dépérissement et les caractéristiques dendrométriques (hauteur dominante, circonférence dominante, hauteur moyenne, circonférence moyenne et densité totale) avec l'analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 95% émettent des relations non significatives sauf pour la circonférence moyenne, indiquant, ainsi, une présence de l'influence de l'espace vital sur la vigueur des arbres.

La relation entre le dépérissement et les paramètres écologiques (altitude, pente de terrain, texture du sol, pH du sol et le taux de la matière organique) par le biais de l'analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 95 ne présente aucune forme de relation pour l'ensemble des cédraies (Theniet El Had et Ain Antar), il s'agit d'une homogénéité sur une superficie peu importante en comparaison avec la superficie du massif de l'Ouarsenis.

L'analyse des cernes effectuée sur 10 stations pour la cédraie de Theniet El had et une station pour celle d'Ain Antar a montré des épaisseurs de cernes moyennes annuelles nettement variables d'une année à l'autre reflétant la variabilité climatique sur une durée allant de 130 à 350 avec une allure générale régressive. L'application de l'analyse de la variance à un facteur au seuil de signification de 99% présente un résultat, dans l'ensemble, hautement significatif pour l'ensemble des stations. Le dernier siècle de l'étude dendrochronologique se caractérise par l'enregistrement de fluctuations importantes surtout entre 1936 et 1985, une période correspondant au dénombrement de 3000 arbres morts sur pieds. Cette situation met à l'origine



l'influence du climat comme facteur aggravant agissant sur les arbres de faibles vigueurs, soit ceux déjà soumis à une compétition pour l'espace vital.

L'utilisation du système d'information géographique à travers l'application du NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) sur des périodes de 5ans entre l'année 1985 et 2020 rapporte que pour le parc national de Theniet El Had le cèdre présente un maintien fragile avec une superficie représentant 44% de la surface totale, un signe timidement positif, dû essentiellement à l'amélioration des conditions climatiques, déjà remarqué lors de l'étude dendrochronologique d'une part et les opérations d'assainissement effectuées par le service forestier d'une autre part.

Pour la cédraie d'Ain Antar qui ne présente pas un nombre alarmant d'arbre dépéris, la situation est plus prometteuse avec une augmentation de 5% entre 1985 et 2020 où la superficie du cèdre a passé de 31% à 36%. Cela est dû à l'exposition la plus adéquate avec l'amélioration des conditions climatiques. D'ailleurs il a été remarqué une régénération abondante dans le nord-est de la cédraie contrairement à celle de Theniet El Had où la régénération est quasiment absente.

A travers l'étude de ces cédraies il est à signaler que ces deux écosystèmes sont fragilisés par les différents acteurs agissant sur leurs pérennités tant naturelles qu'anthropiques les introduisant dans une succession écologique régressive.

Par le biais de la réalisation de ce travail, nous souhaitons avoir cadré au meilleur les problématiques liées à la complexité du processus du dépérissement tout en intégrant l'ensemble des hypothèses évoquées sous la vision d'une analyse chronologique des étapes de dépérissement.

Le choix d'une essence de reboisement doit être raisonné en fonction des contraintes climatiques qui apparaîtront successivement durant la vie du boisement. Malgré les incertitudes sur les modèles climatiques, il est nécessaire d'anticiper au mieux les effets directs et indirects des changements climatiques tels que la fréquence accrue et la durée plus longue des sécheresses ou l'augmentation des températures.

Pour réussir, un reboisement en cèdre devait répondre à des conditions strictes liées au milieu, au matériel végétal, aux techniques d'installation et de conduite du peuplement.

# **Références Bibliographiques**

1. **Abdelhamid, D., Marniche, F., Allal-Benfekih, L., Benadjroud, N., & Mouna, M. (2017).** Importance des coléoptères sylvatiques associés au cèdre de l'Atlas au niveau du parc national de Theniet El Had (Algérie). *Agrobiologia*, X(X), 297-311. Recupéré de <http://agrobiologia.net/online/tag/cedre-de-latlas/>
2. **Achhal, A., Akbali, O., M., Benabid, A., M'hrit, A., Peyer, C., Quezel, P., & Rivars-Martinez, S. (1980).** *Ecologie mediterranea* N°5 - 1985 à propos de la valeur bioclimatique et dynamique de quelque essences foresieres au Maroc.
3. **Amel, E., Frédéric, G., Belgacem, H., Florent, M., & Salah, G. (2010).** Croissance radiale du chêne liège secheresse. *Sécheresse*, 21(1), 34-41.
4. **ANB. (2004).** Études d'excursions et de surveillance des travaux de construction du barrage de Koudiet Rosfa : Monographie de l'aménagement. Alger : Dar Al Handasah, 63 p.
5. **APC Agence Parisienne du Climat (2022)**, September 16). Changement climatique. Retrieved from <https://www.apc-paris.com/changement-climatique>
6. **Arbez, M., Ferrandes, P., & Uyar, N. (1978).** Contribution à l'étude de la variabilité géographique des Cèdre. *Annales des Sciences Forestières*, 35(4), 265-284.
7. **Agenjo, R. (1941).** Monographia de la familia Thaumetopoeidae (Lepidoptera, Thaumetopoeidae). *Eos, Revista Española de Entomología*, 17, 69-130.
8. **Alteyrac, J., Zhang, SY., Cloutier, A., & Ruel, JC. (2005).** Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP). *Wood and Fiber Science*, 37(1), 83-94.
9. **Anonyme. (1984).** Étude et projets pour la mise en valeur des terres, aménagement des forêts et des parcs dans le massif de l'Ouarsenis. Vol. 19. Leskomplekt, Bulgarie, 169 p. + annexes.
10. **Anonyme. (2008).** Plan de gestion du Parc National de Theniet El Had. Direction Générale des Forêts, Ministère de l'Agriculture et du Développement Durable, Algérie, 145 p.
11. **Aussenac, J.-M., & Guehl, J. M. (1990).** Dépérissement et accidents climatiques : Écophysiologie du cèdre (*Cedrus* sp.). Conséquences pour la sylviculture. Station de Sylviculture et de Production, INRA, Nancy, pp. 191-139.
12. **Bariteau, M., & Ferrandes, P. (1990).** L'amélioration des cèdres en France. Symposium International sur le cèdre, 366-379. Antalya, Turquie.
13. **Bates, L. S. (1973).** Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207.

14. **Belmedjahed, (2014) in** BOURORGA ACHWAK Etude de la phytodiversité dans quelques sites choisis dans les Monts de l'Ouarsenis page
15. **Benabaid, A. (1994).** Biogéographie phytosociologie et phytodynamique des cédraies de l'Atlas *Cedrus atlantica* (Manetti). 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 (special), 61-76.
16. **Bernard, A., & Ficheur, É. (1902).** Les cédraies du Maroc. Annales de Géographie, 11e Année, No. 57, 221-246. Armand Colin.
17. **Bentouati A., Bariteau M., (2006).** Réflexions sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas des Aurès (Algérie). Forêt Méditerranéenne, vol. 27, no. 4, pp. 317-322. Available at: <http://www.foret-mediterraneenne.org/fr/catalogue/id1011-reflexions-sur-le-deperissement-du-cedre-de-l-atlas-des-auresalgerie>
18. **Bini, L. M., & Ribeiro, G. H. (2017).** The vicious circle of forest degradation: Causes and effects in the Amazon biome. Land Degradation & Development, 28(5), 1023-1031.
19. **Bonneau., M. et Landman, (1988).** Le dépérissement des forêts en Europe. *Rech.* 205 (19), décembre 1988, p1542-1556.
20. **Bonneau M., (1994),** Constituants et propriétés du sol / par Maurice Bonneau et Bernard Souchier. - 2e édition 1 vol. (XX-665 p.-IV p. de pl. en coul.) ill. en noir et en coul. ; 25 cm 2-225-84019-9 (rel.) 635 FRF
21. **Boudy P., (1950).** Economie forestière Nord-Africaine monographie et traitement des essences forestières. Éd. Larose, Tome 2, pp. 529-619.
22. **Boudy P., (1952).** Guide forestier en Afrique du Nord. Ed la maison rustique, Paris, 288p.
23. **The "Plan national de développement forestier (PNDF).** Rapport de synthèse national" was published in 2009 by the Bureau national d'études pour le développement rural (BNEDER) in Algeria.
24. **Bruand A., Chenu C., (1994).** Constitution physique du sol. Techniques agricoles, n° 1130, 12 p.
25. **Brönnimann., S. (2018).** Klimatologie. Berne : Haupt Verlag.
26. **Chbouki., (1994).** Contribution à l'étude de l'organisation reproductive du cèdre de L'Atlas. Thèse de magistère-Université de Batna, P5-13.
27. **Cheddadi, R. (2004).** Environmental changes in North-West Africa: past, present, and future. In A.M. Semah & J. Renault-Miskowski (Eds.), Evolution of vegetation over the past two million years (pp. 104-125). Artcom Editions.
28. **Côte, (1974).** CarswellOnt 254, 3 NR 341, 51 DLR (3d) 244 (Ont. CA 1974).

- 
29. **Cook, E.R. and Kairiukstis, L.A. (1990)** Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Springer, New York.
  30. **Egli, H-R., Hasler, M. & Probst, M. (2016).** Geography: Knowledge and Understanding. Berne : hep-Verlag.
  31. **Delkov et Grozev., (1994).** Aire de répartition du Cèdre de l'Atlas.
  32. **Delatour, C., & Guillaumin, J.-J. (1984).** Un Pourridié méconnu le *Collybia fusipes*. Comptes rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France, 70(1), 123-126.
  33. **Demarteau, M. (2006).** Dessiner pour graver, graver pour dessiner. In D. Cordellier (Ed.), Le dessin dans la révolution de l'estampe (pp. 55-65). Paris : L'Echelle de Jacob, Société du salon du Dessin.
  34. **Derradj A. (1990).** Etude des populations de *cedrus atlantica* M. en Algérie. Thèse de Doctorat. Université Paul Sabatier, Toulouse, France. 288 pages.
  35. **Derak M., M'hirit O., Mouflih B., Et-Tobi M., (2008).** Influence de la densité et du type de peuplement sur le dépérissement du Cèdre à Sidi M'Guild (Moyen Atlas marocain). Forêt Méditerranéenne, 29: 23-32.
  36. **Díaz-Balteiro, L., and C. Romero. "A (2008).** Critical Review of Adaptive Forest Management and Planning." *Forest Ecology and Management*, vol. 256, no. 3, 2008, pp. 237-241. ScienceDirect, doi:10.1016/j.foreco.2008.04.030.
  37. **DGF, 2002** direction générale des forets
  38. **D'Arrigo, R., Wilson, R., and Jacoby, G. (2006).** "On the long-term context of late 20th-century warming." *Journal of Geophysical Research* 111(D3) : D03103.
  39. **F.A.O., (2010).** Situation des forêts du monde. Rome : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
  40. **F.A.O., (2011).** Situation des forêts du monde. Rome : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
  41. **FAO. (2013).** Forests and Climate Change : A Synthesis of Current Knowledge. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
  42. **Farjon, A. (1990).** Pinaceae drawings and descriptions of the genera *Abies*, *Cedrus*, *Pseudolarix*, *Keteleeria*, *Nothotsuga*, *Tsuga*, *Cathaya*, *Pseudotsuga*, *Larix* and *Picea*. Koeltz scientific books. 330 p.
  43. **Farjon, A. (2010).** A Handbook of the World's Conifers. Koninklijke Brill, Leiden, Pays-Bas.
  44. **Fritts, H. C. (1976).** Tree Rings and Climate. Academic Press, Londres, Royaume-Uni.
  45. **Forest Ecology and Management**, publié par Elsevier. Cette revue publie des articles sur la gestion des forêts et les méthodes pour surveiller les forêts et les écosystèmes forestiers

- 
- 46. Jouzel, J., & Debroise, A. (2014).** Le défi climatique. Objectif : 2°C ! Paris : Dunod.
- 47. Halimi., A. (1980).** L'Atlas Blidéen – climat et étages végétaux. Office des publications universitaires – Alger. Edition n° 648,532p.
- 48. Harfouche, A., & Nedjahi, A. (2003).** Prospections écologiques et sylvicoles dans les cédraies du Bélézma et de l'Aurès à la recherche de peuplements semenciers et d'arbres plus. *Revue Forestière Française (biologie et écologie)*, (1), 113-122.
- 49. GIEC. (2014).** Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse. Contribution des groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève : GIEC.
- 50. Gagnon, R., & Roy, V. (1994).** Le réseau de surveillance des écosystèmes forestiers (RESEF). 1. Définitions et méthodes. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Québec.
- 51. Gaussen, J. (1964).** Approche chronologique de quelques sites ornés paléolithiques du Périgord par datation Carbone 14, en spectrométrie de masse par accélérateur, de leur mobilier archéologique/Chronological approach to a few decorated Paleolithic sites in the Perigord based on C14 dating of associated archaeological objects. *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 61(7-8), 420-426.
- 52. Kherchouche, D., Kalla, M., Gutiérrez, 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). *Sécheresse*, 24, 129-137. <https://doi.org/10.1684/sec.2013.0384>
- 53. IPCC (2007).** Intergovernmental Panel on Climate Change Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts. Geneva, Switzerland: IPCC.
- 54. IPCC (2013).** Summary for Policymakers. In *Climate Change 2013. The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M.
- 55. IPCC. (2014).** *Climate Change 2014 : Impacts, Vulnerability and Adaptation. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- 56. Grissino-Mayer, H. D. (2001).** Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57(2), 205-221.
- 57. Lambert Georges., et Lavier Catherine., 1985.** Dendrochronologie. In : *Les Nouvelles de l'archéologie*, n°18, Hiver 84-85 1985. Archéobotanique. 1ère partie : les différentes

- disciplines mises en jeu. pp. 44-47 ; doi :<https://doi.org/10.3406/nda.1985.1363>  
[https://www.persee.fr/doc/nda\\_0242-7702\\_1985\\_num\\_18\\_1\\_1363](https://www.persee.fr/doc/nda_0242-7702_1985_num_18_1_1363)
- 58. Landmann, G., (1994).** Le dépérissement du sapin pectiné et de l'épicéa commun dans les montagnes françaises au cours des années 1980. *Revue forestière française*, 46(5), pp.522-537.
- 59. Lavier Catherine., Perrier Patricia, Vincenot Sophie, Lambert Georges, (1988).** Pratique de la dendrochronologie. In: *Histoire & Mesure*, 1988 volume 3 - n°3. Le climat. pp. 279-308 ; doi : <https://doi.org/10.3406/hism.1988.1339>  
[https://www.persee.fr/doc/hism\\_0982-1783\\_1988\\_num\\_3\\_3\\_1339](https://www.persee.fr/doc/hism_0982-1783_1988_num_3_3_1339)
- 60. Linares J. C., Taïqui L., Sangüesa-Barreda G., Ignacio Seco J., Camarero J. J., (2013).** Age-related drought sensitivity of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan Middle Atlas forests. *Dendrochronologia*, 31 : 88-96.  
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.08.003>
- 61. Lebourgeois, F. and Mérian, P. (2012).** Principes et méthodes de la dendrochronologie. UMR INRA-LERFOB 1092 – Equipe Ecologie Forestière – AgroParisTech-ENGREF.
- 62. Le Goff, N. and Levy, G. (1984).** Productivité du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en région Nord-Picardie B.-Etude des relations entre la productivité et les conditions de milieu. pp. 136-170.
- 63. 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". In *Le cèdre 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), p. 4-21.
- 64. Manion, P.D. (1991).** *Tree Disease Concepts*. 2nd edition. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. 402 pp.
- 65. Manion, P.D. (1988).** Pollution and Forest Ecosystems. In *Proceedings 14th International Botany Congress, Berlin (FRG)*. Greuter, W. and Zimmer, B. (Eds.), Koeltz Scientific Books, Königstein, pp. 405-421.
- 66. Mattauer, M. (1958).** *Etude géologique de l'Ouarsenis oriental (Algérie)*. Publication du Service des Cartes Géologiques d'Algérie, Algérie, 534 pp.
- 67. M.A.T.E. (2008).** Schéma d'aménagement des zones de montagnes monts de l'Ouarsenis. Rapport de synthèse, B.N.E.D.E.R (Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural), Alger, 47 pp.
- 68. Meddour, R. (2010).** Bioclimatologie, phytogéographie et phytosociologie en Algérie, exemple des groupements forestiers et préforestiers de la Kabylie Djurdjuréenne. Thèse de Doctorat d'État en Sciences agronomiques, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou.

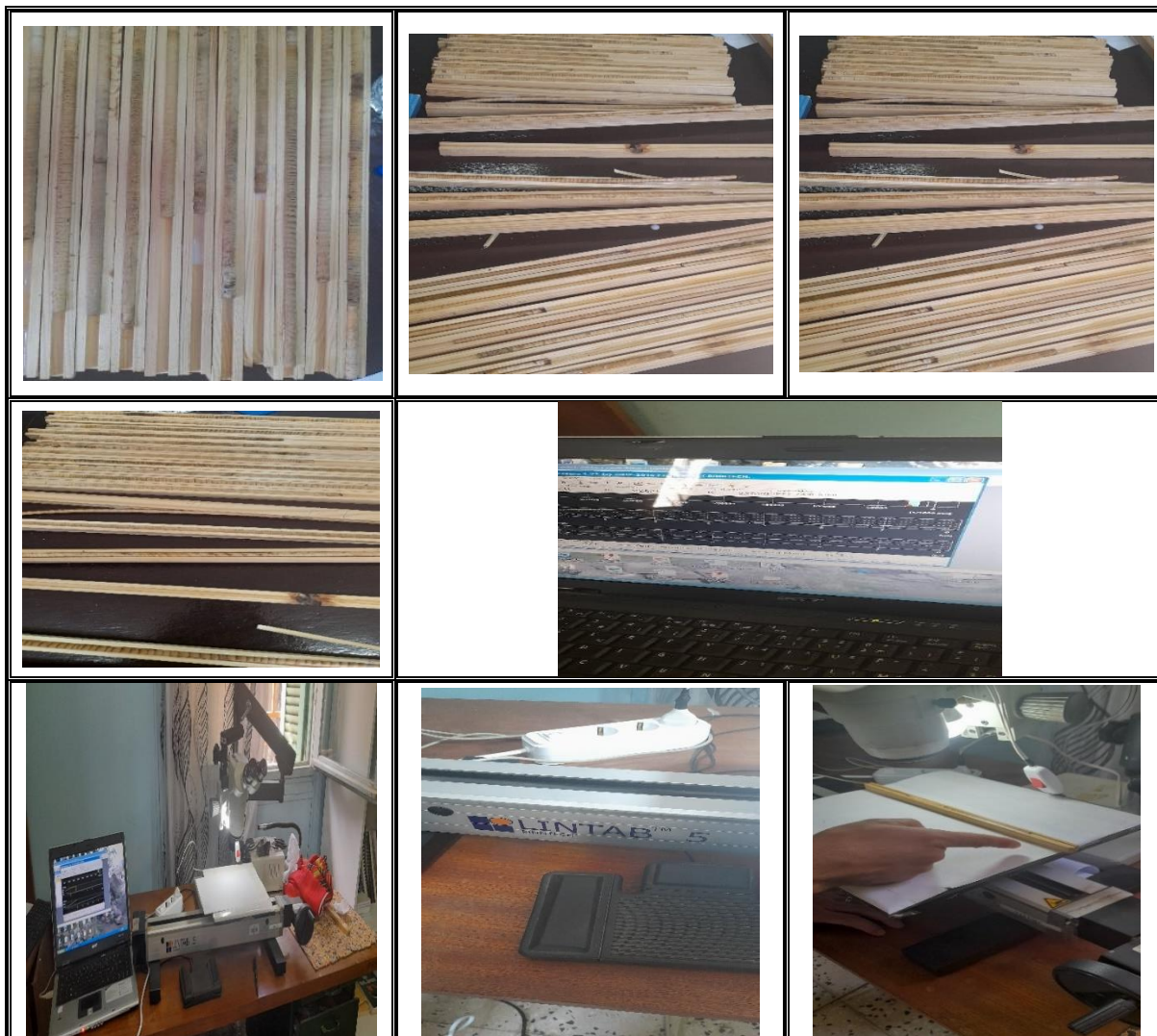
- 69. World Meteorological Organization (WMO). (2019).** Statement on the State of the Global Climate in 2018.
- 70. Medjerab, M. (2005).** Etude pluviométrique de l'Algérie Nord Occidentale. Approche statistique et cartographie automatique. Thèse de Doctorat d'Etat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), 706 pp.
- 71. Messaoudene, M., Rabhi, K., Megdoud, A., Sarmoum, M., & Dahmani-Megrerouche, M. (2013).** État des lieux et perspectives des cédraies algériennes. Forêt Méditerranéenne, 34 : 1-8.
- 72. Pardé, J., & Bouchon, J. (1988).** Dendrométrie. Nancy, France, ENGREF, 328 pp
- 73. Office fédéral de l'environnement (OFEV). (2018).** La politique climatique suisse. Mise en oeuvre de l'Accord de Paris. Info Environnement 2018. Berne : Office fédéral de l'environnement. Retrieved from <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/publications-etudes/publications/politique-climatique-suisse.html>
- 74. Quézel, P. (1980).** Biogéographie et écologie des conifères sur le pourtour méditerranéen. In Person Actualités d'écologie forestière. Paris: Bordas. pp. 205-256.
- 75. Quézel P., Médail F., (2003).** Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Paris, France, Lavoisier, 576 p.
- 76. Rondeux J., (1999).** La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Belgique, Les presses agronomiques de Gembloux, 251p.
- 77. Rondeux, J. (1999).** La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Presses agronomiques de Gembloux.
- 78. Rondeux, J. Thibaut, A. Claessens, H. (1995).** Comment estimer la productivité des peuplements d'Epicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.) en Ardenne Fiche technique n°8, gestion et économie forestières section écologie. Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux. 2p.
- 79. Rondeux J., Lecomte H., Florkin P., Thirion M. (2002).** L'inventaire permanent des ressources ligneuses de la région wallonne: principaux aspects méthodologiques. Les cahiers forestiers de Gembloux, n° 19, Gembloux, 22 p
- 80. Sarmoum M., (2016).** Effets des facteurs stationnels sur la croissance radiale et la réponse du pin d'alep au climat dans le massif de l'Ouarsenis, Algérie. Vue d'ensemble de la zone culminante de l'Ouarsenis où de vastes pinèdes se développent sur substrat calcaire. Bois et forêts des tropiques, 2016, n° 329 (3)
- 81. Serge Elmi., (2007).** Géologue. - Enseignant en paléontologie, stratigraphie et dynamique des bassins sédimentaires à l'Université Claude-Bernard-Lyon I (en 1994)



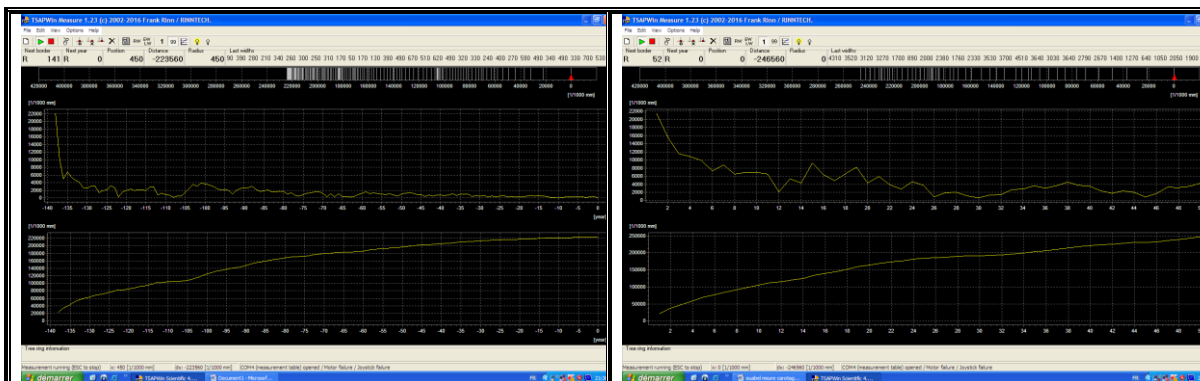
- 82. Sarmoum M., (2008).** Impact du climat sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus Atlantica Manetti*). Diagnostic dendroécologique et climatique de la cédraie de Theniet El Had (Wilaya de Tissemsilt) ; Mémoire de Magister en sciences de la nature Spécialité Ecologie et Environnement ; USTHB, Algérie. 161.
- 83. Sarmoum, M. (2016).** Étude de la dynamique des systèmes forestiers du massif de l'Ouarsenis dans le contexte des changements globaux. *Bois et forêts des tropiques*, 329(3).
- 84. Sarmoum M., Navarro-Cerrillo R. M., Guibal F., Abdoun F., (2018).** Structure, Tree Growth and Dynamics of *Cedrus atlantica Manetti* Forests in Theniet El Had National Park (N-W Algeria). *Open Journal of Ecology*, 8: 432-446. <https://doi.org/10.4236/oje.2018.88026>
- 85. Smith, J. R., & Jones, P. Q. (2019).** The use of GIS for studying terrestrial ecosystems and environmental impacts. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(3), 256-267. doi: 10.1016/j.jag.2018.11.012
- 86. Beghami (2003)** cites a study by Sazonov et al. (1976) in which they contributed to a special issue honoring Prof. R. Rossi and Prof. E. Rúveda. The article, titled "Synthetic Approach to the Study of the Chemical Structure of Alkaloids and Related Compounds", was published in *ARKIVOC* and can be found in volume 2003, issue x, pages 323-334.
- 87. Sebbar A., Sebbar M., Hsaine H., Fougrach M. and Badri W., (2012).** Étude des variations climatiques de la région centre du Maroc. 25ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Grenoble 2012.
- 88. Speer., J. H. (2010).** Principles of dendrochronology. Springer Science & Business Media.
- 89. Sari, D. (1977).** L'Algérie vue par les intellectuels algériens en France. *L'Afrique et l'Asie modernes*, no (114), pp12-24.
- 90.** Soil Science Society of America Book Series, vol. 5, Soil Science Society of America, 2010.
- 91. Taleb, M. L. (2017).** Analyse de l'impact et de l'état social des troncs sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas *Cedrus atlantica Manetti* dans le parc national de Theniet el Had, en Algérie. *Revue Forestière Française*, 69(4), 425-438.
- 92. Toth J. (1990).** The cedar : utilization and technological quality. *La Forêt Prévue*, No. 194, pp. 57-60. The landscape value of cedar forests for tourism. *La Forêt Prévue*, No. 195, pp. 50-57.
- 93. Toth, J. (2005).** In-depth study of the French cedar species. Paris: Le Harmattan. Focus on biology, ecology, and agronomy. 207 pages.

- 
- 94. Trouet, V., Esper, J., Graham, N., Baker, A., Scourse, J.D., & Frank, D. (2009).** Persistent positive covariance of summer temperatures and drought in the western United States. *Science*, 324(5926), 78-80.
- 95. Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R., & Swetnam, T. W. (2006).** Projecting future changes in forest disturbance regimes and their ecological and social consequences. *Forest Ecology and Management*, 222(1-3), 1-10
- 96. Yahi, N. (1995).** Etude phytosociologique des formations de cèdre (*Cedrus atlantica* Manetti) dans l'Atlas tellien (Babors, Djurdjura, Ouarsenis) (Thèse de doctorat, Université de Bab Ezzouar).
- 97. Zedek, M. (1993).** Productivity study of the Atlas cedar (*Cedrus Atlantica* Manetti) in Theniet El Had National Park. Master's thesis, National Agronomic Institute of Algeria, 175 pages.
- 98. Zeghari, A. (2013).** Study of diachronous redeposited blocks in the Albian-Aptian flysch (Grand Pic de l'Ouarsenis): mapping and sedimentological aspects. Master's thesis in basin geodynamics and sedimentary balance.
- 99. Zaremski, A., Bakkali-Yakhlef, S., Chaintreuil, C., Abbas, Y., Prin, Y., Abourouh, M., et al. (2007).** Caractérisation moléculaire du M'Jej, agent de dépérissement des cédraies du Maroc. *Bois et Forêts des Tropiques*, 291(1), 67-73  
<https://doi.org/10.19182/bft2007.291.a20358>
- 100. Zine El Abidine, M. (2003).** Investigated the causes of forest decline in Morocco and proposed a strategy for combating it. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 14(1), 44-52.

# ANNEXES

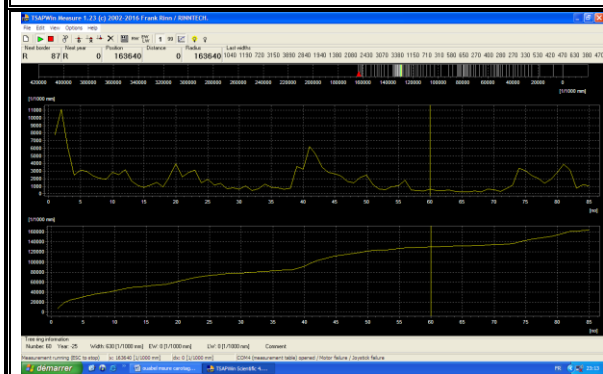


Station de dendrochronologie  
Méthode d'analyses dendrochronologiques des carottes du cèdre d'atlas



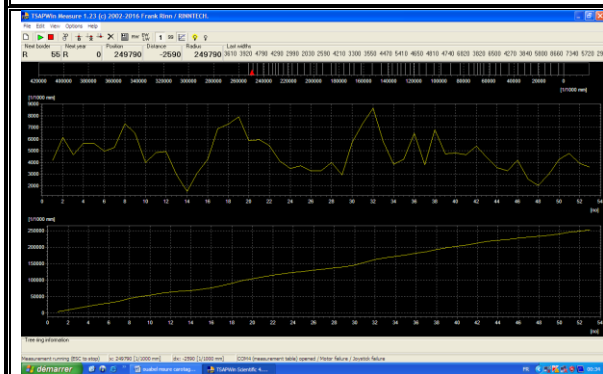
Carotte station. 9 Ech 01

Carotte station. 8 Ech 01



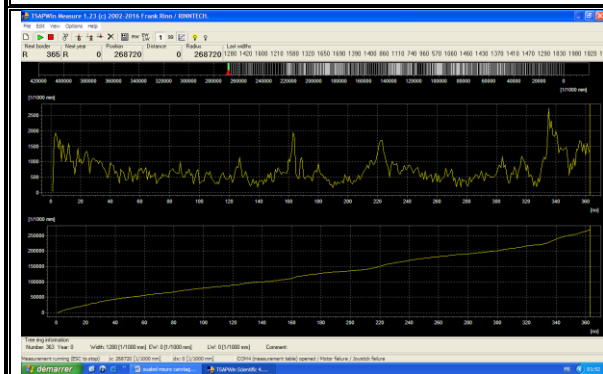
Carotte station. 3 Ech 01

Carotte station.17 Ech 01



Carotte station.13 Ech 01

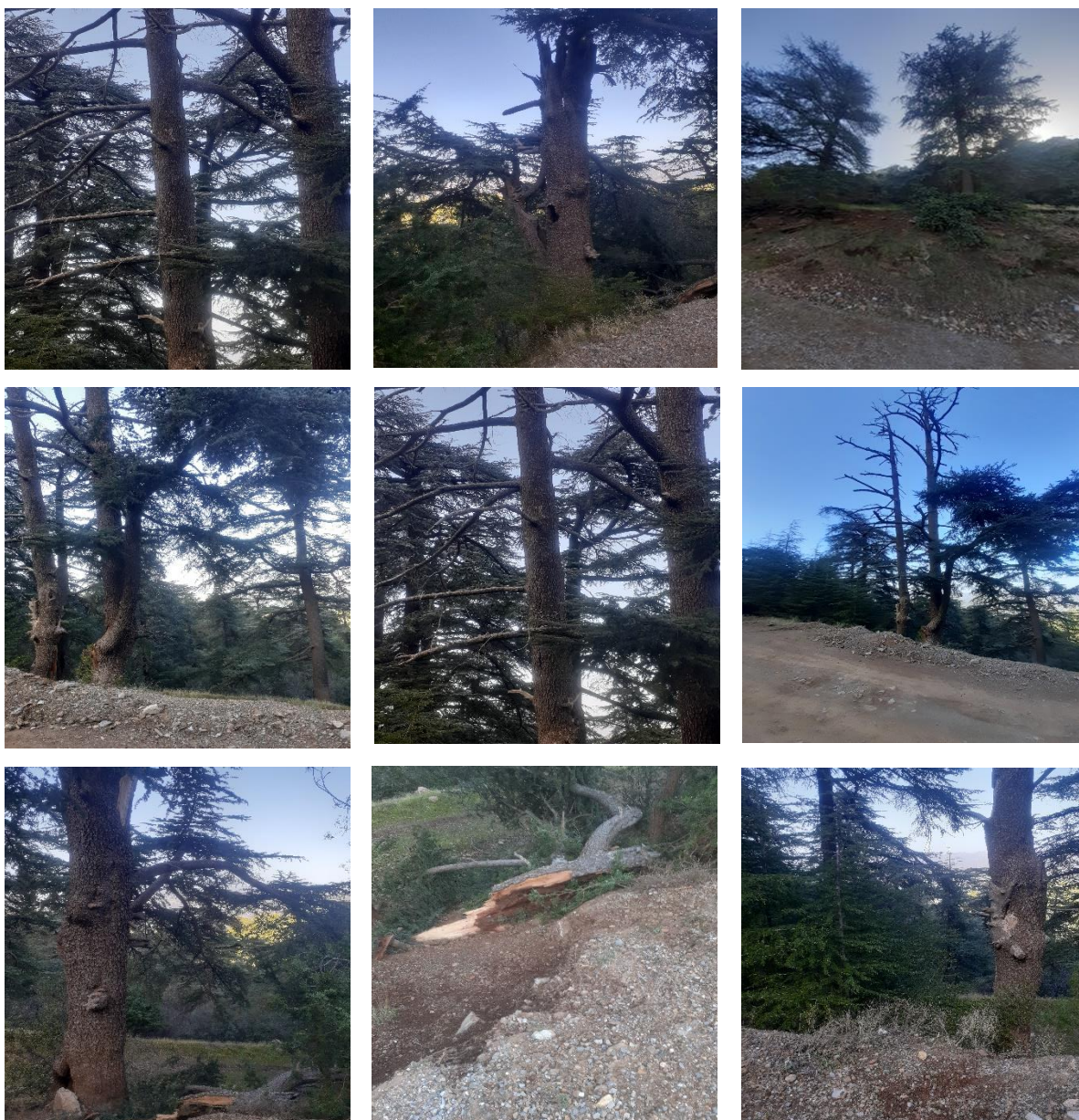
Carotte station.10 Ech 01



Carotte station.16 Ech 01

Carotte station.12 Ech 01

Mesures dendrochronologiques de quelques carottes du cèdre de l'Atlas à l'INRF d'Azazga Tizi Ouzou, 2022



Photos montrant l'état actuel du cèdre de l'Atlas  
dans les cédraies du parc national de Theniet El Had et d'Ain Antar



Coupes transversales d'arbres de cèdre abattus après son déclin dans le parc national de Thniet El Had



Analyses physico-chimiques et biologiques des sols au laboratoire  
(Ouabel, Soufi et Adem, 2022 )

\*\*\*\*\*

\*\*\* TSAP CROSS-DATING \*\*\* DATE: 2005.08.19 TIME: 22.05. \*\*\*

-&gt; All results of sample and references:

-&gt; Min LeftOverlap=30 / MinRightOverlap=30

-&gt; Chrono signature conditions: Density&gt;4 / Internal Glk&gt;75

-&gt; Results listed for each sample-reference pair.

-&gt; List all results

-&gt; Match acceptance: logical OR - connection of threshold values, one of the following threshold values has to be exceeded.

Threshold conditions:

Glk % &gt; 60 ; SGlk % &gt; 70 ; SSGlk % &gt; 70 ; TV &gt; 3,0 ; CrC &gt; 0,6; CDI &gt; 10

```
-----
Sample (=Chrono): 5-1 tiissemsilt 0 ---139 1883 2021
Reference (=Chrono): 5-1 tiissemsilt 0 ---139 1883 2021
```

Sample	Ref.	PosL	PosR	OVL	Glk	GSL	_SG	S_G	SSG	SSi	RSi	%	CrC	TV	TVBP	TVH	CDI	DateL	DateR
5-1	5-1		139	139	100***	0	0	0	0	137	100	100	100	100	333	1883	2021		
5-1	5-1	-1	137	138	39	0	0	0	0	136	80	15,4	1,2	1,5	2	1882	2020		
5-1	5-1	2	140	138	39	0	0	0	0	136	80	15,4	1,2	1,5	2	1884	2022		
5-1	5-1	-2	136	137	49	0	0	0	0	135	70	11,3	6,8	3,5	8	1881	2019		
5-1	5-1	3	141	137	49	0	0	0	0	135	70	11,3	6,8	3,5	8	1885	2023		
5-1	5-1	-3	135	136	50	0	0	0	0	134	65	9,9	1,0	0,2	1	1880	2018		
5-1	5-1	4	142	136	50	0	0	0	0	134	65	9,9	1,0	0,2	1	1886	2024		
5-1	5-1	-4	134	135	49	0	0	0	0	133	63	9,4	1,4	0,5	1	1879	2017		
5-1	5-1	5	143	135	49	0	0	0	0	133	63	9,4	1,4	0,5	1	1887	2025		
5-1	5-1	-7	131	132	56	0	0	0	0	130	61	8,9	1,2	1,2	2	1876	2014		
5-1	5-1	8	146	132	56	0	0	0	0	130	61	8,9	1,2	1,2	2	1890	2028		
5-1	5-1	6	144	134	44	0	0	0	0	132	61	8,9	1,8	1,6	2	1888	2026		
5-1	5-1	-5	133	134	44	0	0	0	0	132	61	8,9	1,8	1,6	2	1878	2016		
5-1	5-1	7	145	133	48	0	0	0	0	131	60	8,7	0,5	0,5	1	1889	2027		
5-1	5-1	-6	132	133	48	0	0	0	0	131	60	8,7	0,5	0,5	1	1877	2015		
5-1	5-1	-8	130	131	45	0	0	0	0	129	56	7,6	0,6	0,6	1	1875	2013		
5-1	5-1	9	147	131	45	0	0	0	0	129	56	7,6	0,6	0,6	1	1891	2029		
5-1	5-1	-9	129	130	48	0	0	0	0	128	55	7,5	0,8	1,3	2	1874	2012		
5-1	5-1	10	148	130	48	0	0	0	0	128	55	7,5	0,8	1,3	2	1892	2030		
5-1	5-1	-10	128	129	55	0	0	0	0	128	55	7,4	2,6	1,7	3	1873	2011		
5-1	5-1	11	149	129	55	0	0	0	0	127	55	7,4	2,6	1,7	3	1893	2031		
5-1	5-1	-11	127	128	48	0	0	0	0	127	47	6,0	1,9	1,7	3	1872	2010		
5-1	5-1	12	150	128	48	0	0	0	0	126	47	6,0	1,9	1,7	3	1894	2032		
5-1	5-1	-18	120	121	61**	0	0	0	0	120	47	5,9	0,7	1,3	2	1865	2003		
5-1	5-1	19	157	121	61**	0	0	0	0	119	47	5,9	0,7	1,3	2	1901	2039		
5-1	5-1	-81	57	58	50	0	0	0	0	57	-47	3,9	1,5	2,0	0	1802	1940		
5-1	5-1	82	220	58	50	0	0	0	0	56	-47	3,9	1,5	2,0	0	1964	2102		
5-1	5-1	81	219	59	49	0	0	0	0	57	-45	3,8	0,9	0,6	0	1963	2101		
5-1	5-1	-80	58	59	49	0	0	0	0	58	-45	3,8	0,9	0,6	0	1803	1941		
5-1	5-1	-93	45	46	61	0	0	0	0	45	44	3,3	1,9	2,0	0	1790	1928		
5-1	5-1	94	232	46	61	0	0	0	0	44	44	3,3	1,9	2,0	0	1976	2114		
5-1	5-1	-17	121	122	47	0	0	0	0	121	43	5,2	1,1	0,2	1	1866	2004		



5-1	5-1	18	156	122	47	0	0	0	0	120	43	5,2	1,1	0,2	1	1900	2038
5-1	5-1	-96	42	43	46	0	0	0	0	42	43	3,0	3,2	2,5	0	1787	1925
5-1	5-1	97	235	43	46	0	0	0	0	41	43	3,0	3,2	2,5	0	1979	2117
5-1	5-1	-19	119	120	47	0	0	0	0	119	43	5,1	0,7	0,8	1	1864	2002
5-1	5-1	20	158	120	47	0	0	0	0	118	43	5,1	0,7	0,8	1	1902	2040
5-1	5-1	13	151	127	48	0	0	0	0	125	42	5,2	2,4	2,1	3	1895	2033
5-1	5-1	-12	126	127	48	0	0	0	0	126	42	5,2	2,4	2,1	3	1871	2009
5-1	5-1	14	152	126	47	0	0	0	0	124	42	5,2	2,4	1,4	2	1896	2034
5-1	5-1	-13	125	126	47	0	0	0	0	125	42	5,2	2,4	1,4	2	1870	2008
5-1	5-1	-20	118	119	53	0	0	0	0	118	41	4,9	1,3	1,2	2	1863	2001
5-1	5-1	21	159	119	53	0	0	0	0	117	41	4,9	1,3	1,2	2	1903	2041
5-1	5-1	-14	124	125	53	0	0	0	0	124	40	4,8	0,8	0,5	1	1869	2007
5-1	5-1	15	153	125	53	0	0	0	0	123	40	4,8	0,8	0,5	1	1897	2035
5-1	5-1	-16	122	123	45	0	0	0	0	122	38	4,6	0,8	0,3	1	1867	2005
5-1	5-1	17	155	123	45	0	0	0	0	121	38	4,6	0,8	0,3	1	1899	2037
5-1	5-1	-28	110	111	54	0	0	0	0	110	38	4,3	2,1	1,4	2	1855	1993
5-1	5-1	29	167	111	54	0	0	0	0	109	38	4,3	2,1	1,4	2	1911	2049
5-1	5-1	-37	101	102	52	0	0	0	0	101	37	3,9	0,5	0,5	0	1846	1984
5-1	5-1	38	176	102	52	0	0	0	0	100	37	3,9	0,5	0,5	0	1920	2058
5-1	5-1	-25	113	114	56	0	0	0	0	113	36	4,1	0,8	0,3	1	1858	1996
5-1	5-1	26	164	114	56	0	0	0	0	112	36	4,1	0,8	0,3	1	1908	2046
5-1	5-1	-38	100	101	51	0	0	0	0	100	36	3,8	1,8	1,3	1	1845	1983
5-1	5-1	39	177	101	51	0	0	0	0	99	36	3,8	1,8	1,3	1	1921	2059
5-1	5-1	-29	109	110	48	0	0	0	0	109	36	4,0	0,4	1,0	1	1854	1992
5-1	5-1	30	168	110	48	0	0	0	0	108	36	4,0	0,4	1,0	1	1912	2050
5-1	5-1	-15	123	124	43	0	0	0	0	123	36	4,2	2,2	1,8	2	1868	2006
5-1	5-1	16	154	124	43	0	0	0	0	122	36	4,2	2,2	1,8	2	1898	2036
5-1	5-1	25	163	115	39	0	0	0	0	113	35	3,9	0,3	0,8	0	1907	2045
5-1	5-1	-24	114	115	39	0	0	0	0	114	35	3,9	0,3	0,8	0	1859	1997
5-1	5-1	-30	108	109	53	0	0	0	0	108	34	3,7	1,0	0,6	1	1853	1991
5-1	5-1	31	169	109	53	0	0	0	0	107	34	3,7	1,0	0,6	1	1913	2051
5-1	5-1	22	160	118	53	0	0	0	0	116	33	3,8	0,9	0,9	1	1904	2042
5-1	5-1	-21	117	118	53	0	0	0	0	117	33	3,8	0,9	0,9	1	1862	2000
5-1	5-1	24	162	116	54	0	0	0	0	114	33	3,8	1,1	1,1	2	1906	2044
5-1	5-1	-23	115	116	54	0	0	0	0	115	33	3,8	1,1	1,1	2	1860	1998
5-1	5-1	28	166	112	47	0	0	0	0	110	33	3,7	0,1	0,2	0	1910	2048
5-1	5-1	-27	111	112	47	0	0	0	0	111	33	3,7	0,1	0,2	0	1856	1994
5-1	5-1	-32	106	107	55	0	0	0	0	106	33	3,6	1,7	1,3	2	1851	1989
5-1	5-1	33	171	107	55	0	0	0	0	105	33	3,6	1,7	1,3	2	1915	2053
5-1	5-1	27	165	113	45	0	0	0	0	111	33	3,7	0,8	0,8	1	1909	2047
5-1	5-1	-26	112	113	45	0	0	0	0	112	33	3,7	0,8	0,8	1	1857	1995
5-1	5-1	32	170	108	44	0	0	0	0	106	33	3,6	0,9	1,0	1	1914	2052
5-1	5-1	-31	107	108	44	0	0	0	0	107	33	3,6	0,9	1,0	1	1852	1990
5-1	5-1	-22	116	117	43	0	0	0	0	116	33	3,7	0,5	0,3	0	1861	1999
5-1	5-1	23	161	117	43	0	0	0	0	115	33	3,7	0,5	0,3	0	1905	2043
5-1	5-1	-35	103	104	54	0	0	0	0	103	31	3,3	0,0	0,1	0	1848	1986
5-1	5-1	36	174	104	54	0	0	0	0	102	31	3,3	0,0	0,1	0	1918	2056
5-1	5-1	-36	102	103	51	0	0	0	0	102	31	3,3	0,1	0,3	0	1847	1985
5-1	5-1	37	175	103	51	0	0	0	0	101	31	3,3	0,1	0,3	0	1919	2057
5-1	5-1	-39	99	100	56	0	0	0	0	99	31	3,2	0,3	0,7	1	1844	1982
5-1	5-1	40	178	100	56	0	0	0	0	98	31	3,2	0,3	0,7	1	1922	2060
5-1	5-1	34	172	106	50	0	0	0	0	104	29	3,1	0,4	0,5	0	1916	2054
5-1	5-1	-33	105	106	50	0	0	0	0	105	29	3,1	0,4	0,5	0	1850	1988

