

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE HADJ-LAKHDAR BATNA  
INSTITUT DES SCIENCES VETERINAIRES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES  
DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES



THESE

Présentée Par

KHERCHOUCHE Dalila

En vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES EN AGRONOMIE

Option

FORESTERIE

Approches sylvicole et paléoécologique pour l'étude des  
facteurs de dépérissement et la répartition spatio-temporelle  
du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Man.) de l'Aurès.

Soutenue le 11/12/2013 devant la commission d'examen:

Pr. OUDJEHIH Bachir

Pr. KALLA Mahdi

Dr. THINON Michel

Pr. ALATOU Djamel

Pr. BELHADJ Safia

Pr. BENTOUATI Abdallah

Dr. MALKI Hamana

Université de Batna

Université de Batna

Université de Marseille

Université de Constantine

Université de Djelfa

Université de Batna

Université de Batna

Président

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examinatrice

Examineur

Invité

ANNEE UNIVERSITAIRE 2013/2014

## REMERCIEMENTS

Louange à ALLAH le Tout Puissant qui m'a donné la santé, la force, le courage, la patience et les moyens pour m'aventurer dans les montagnes de l'Aurès et participer dans le financement de la majeure partie de ce travail.

De ces années de thèse, je retiendrais une aventure humaine riche en échanges et en rencontres inoubliables.

Avant d'exposer les résultats de sept ans de labeur continu, il m'est agréable d'exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, dans la réalisation de ce travail par leur aide, leurs conseils et leur soutien. Mes remerciements s'adressent particulièrement à:

- Monsieur le Professeur Mahdi KALLA, Université Hadj-Lakhdar Batna, qui a bien voulu diriger ce travail et qui m'a assuré, d'abord de ses orientations comme directeur de thèse puis de son soutien et aide comme directeur de laboratoire. Un grand merci pour sa confiance.

- Toutes les personnes avec qui j'ai collaboré:

Mon Co-Directeur de thèse Dr. Michel THINON, Chargé de Recherche, CNRS, Université de Marseille (France), qui m'a accompagné sur le terrain lors de prélèvement des sols dans l'Aurès. Je le remercie particulièrement pour sa disponibilité durant mes stages au laboratoire de pédoanthracologie, ses aides et les connaissances qu'il a eu l'amabilité de me transmettre. Un grand merci pour la visite du Mont-Ventoux!!

Monsieur le Professeur Ramzi TOUCHAN, Université d'Arizona (USA), qui m'a initié à la dendrochronologie en 2008 à Istanbul (Turquie). Merci pour son chaleureux accueil en stages au laboratoire LTRR, Université d'Arizona, parfois avec une prise en charge totale. Sa compétence, sa méthodologie ainsi que mon amour pour la dendrochronologie qui date depuis longtemps m'ont beaucoup aidé à apprendre facilement et rapidement les bases de cette discipline si précise que j'ai aimée davantage.

Mademoiselle la Professeur Emilia M. GUTTIEREZ, Université de Barcelone (Espagne) pour sa collaboration en dendrochronologie. Merci de m'avoir accompagné sur le terrain lors d'échantillonnage de différents sites dans les cédraies de l'Aurès et de m'avoir accueilli dans son laboratoire pour les mesures des cernes. Merci pour ses aides, son soutien et sa grande hospitalité de m'avoir hébergé chez elle durant mes différents séjours à Barcelone et ses différentes qualités humaines. Qu'elle sache que je suis particulièrement sensible à la confiance qu'elle m'a accordée. Merci pour les clés de votre maison, du laboratoire, de votre bureau et le mot de passe de votre micro-ordinateur!!

Je tiens aussi à exprimer mes vifs remerciements à:

- Mes stagiaires qui m'ont permis de transmettre ce que j'ai appris avec grand plaisir et passion:

- N.L. MOUKOURI, T. HEZIL, I. SAHRAOUI et H. TAZOULT, pour leur aide sur le terrain lors des inventaires dendrométriques dans les reliefs si sauvages de nos cédraies, parfois sous la neige et la pluie.
- K. BOUCHERIT, M. ABIDI et Z. HEZIL, pour leur aide sur le terrain dans le carottage des arbres.

Sans eux ce travail n'aurait jamais été mené à terme. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

- Tous les membres de mon jury de thèse. Qu'ils sachent que je suis très sensible à l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir accepté si rapidement d'en faire partie:

- Monsieur le Professeur Bachir OUDJEHIH, Université Hadj-Lakhdar Batna, qui m'a fait l'honneur de présider le jury et qui, avant 22 ans, a présidé mon jury de mémoire d'Ingénieur. Merci pour sa disponibilité, sa gentillesse et surtout sa serviabilité.

- Monsieur le Professeur Djamel ALATOU, Université Mentouri Constantine, qui avant 10 ans était membre de mon jury de mémoire de Magistère et que j'apprécie sa contribution dans le jury de ce présent travail.

- Monsieur le Professeur Abdallah BENTOUATI, Université Hadj-Lakhdar Batna, d'avoir accepté de juger ce travail. Merci pour les discussions scientifiques, sa lecture et relecture du quatrième chapitre.

- Madame la Professeur Safia BELHADJ, Université Ziane Achour Djelfa, d'avoir accepté de faire partie de mon jury. Un grand merci pour votre soutien et votre générosité durant notre campagne d'échantillonnage en juin 2012 dans les pinèdes du Djelfa avec le Professeur Ramzi TOUCHAN.

**Je ne peux oublier d'adresser mes sincères remerciements à:**

- Monsieur Hamana MALKI, Maître de Conférences, Université Hadj-Lakhdar Batna. Merci pour sa lecture et relecture de la partie relative à l'étude climatique et ses critiques constructives. Gardez toujours votre bonne humeur et votre sens d'humour!!

- Monsieur le Professeur Tahar BENDAIKHA, Doyen de la Faculté des Sciences, Université Hadj-Lakhdar Batna. Ses qualités humaines, sa personnalité, sa rigueur et son sens de responsabilité m'ont beaucoup apporté durant les trois premières années de ma thèse. Merci infiniment!!

- Monsieur le Professeur Mohamed MELIZI, Directeur de l'Institut des Sciences Vétérinaires et des Sciences Agronomiques, Université Hadj-Lakhdar Batna. Merci pour son aide, son soutien et ses encouragements.

**Que tout le personnel de la conservation des forêts de la wilaya de Batna et de Khenchela trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance pour les moyens logistiques mis à ma disposition et l'aide apportée sur le terrain au cours de plusieurs années. Mes grands remerciements s'adressent particulièrement à Mr le conservateur A. GASMI, A. BRIKI, A. MENASRIA, A. AIOUADJ, T. BRIMA et O. ABIDA.**

**Je remercie ceux qui étaient docteurs avant moi: B. ZITOUNI et D. OUACHEM pour leurs conseils et encouragements.**

**Je remercie toute ma famille: ma mère, mes sœurs et frères, mes belles sœurs, mes beaux frères, mes nièces et neveux, pour leur aide, encouragement et soutien moral.**

**Je tiens enfin à dédier ce travail:**

- A la mémoire de mon père pour tout ce qu'il a fait pour moi et pour toutes les valeurs qu'il m'a transmises et surtout la combativité.

- A la mémoire de mon maître K. ABDESSEMED qui, parti trop tôt, reste l'un de très rares représentants de l'écologie forestière dans le pays. La qualité de son enseignement m'a amené à me pencher vers cette spécialité et à l'aimer. Merci de m'avoir appris le sens d'observation.

# TABLE DES MATIERES

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## Introduction ..... 01

### Premier chapitre: Milieu physique

#### 1.1. Localisation géographique du massif de l'Aurès ..... 05

#### 1.2. Géologie ..... 05

##### 1.2.1. Secondaire ..... 05

###### 1.2.1.1. Trias ..... 05

###### 1.2.1.2. Lias (Toarcien) ..... 05

###### 1.2.1.3. Jurassique (Kimeridgien, Portlandien, Berriasien) ..... 05

###### 1.2.1.4. Crétacé ..... 06

##### 1.2.2. Tertiaire ..... 09

###### 1.2.2.1. Nummulitique ..... 09

###### 1.2.2.2. Néogène (Miocène et Pliocène) ..... 10

##### 1.2.3. Quaternaire ..... 10

#### 1.3. Types de sols ..... 10

#### 1.4. Climat ..... 11

##### 1.4.1. Précipitations ..... 11

###### 1.4.1.1. Gradients pluviométriques ..... 11

###### 1.4.1.2. Tendance des précipitations ..... 11

##### 1.4.2. Températures ..... 12

###### 1.4.2.1. Gradients thermiques ..... 12

###### 1.4.2.2. Tendance des températures ..... 13

##### 1.4.3. Sécheresse climatique ..... 14

###### 1.4.3.1. Rapport $P < 2T$ ..... 14

###### 1.4.3.2. Rapport $P < ETP$ ..... 18

##### 1.4.4. Climagramme d'Emberger ..... 20

#### 1.5. Conclusion ..... 22

### Deuxième chapitre: Répartition spatiotemporelle du cèdre dans l'Aurès. Approche par l'analyse pédoanthracologique

#### 2.1. Intérêt de la méthode ..... 23

2.2. Choix des stations .....	24
2.3. Matériel et méthodes .....	25
2.3.1. Prélèvements de terrain .....	27
2.3.2. Traitements au laboratoire .....	27
2.3.2.1. Extraction .....	27
2.3.2.2. Préparation à l'observation microscopique .....	30
2.3.2.3. Identification, datation des charbons, analyse et présentation des Résultats .....	31
2.4. Résultats .....	36
2.5. Discussion et conclusion .....	49

### **Troisième chapitre: Reconstitution de la sécheresse dans l'Aurès. Approche dendroclimatologique**

3.1. Introduction .....	51
3.2. Matériel et méthodes .....	51
3.2.1. Choix des sites .....	51
3.2.2. Récolte des données .....	52
3.2.2.1. Données relatives aux cernes .....	52
3.2.2.2. Données du climat .....	53
3.2.3. Reconstitution du climat .....	54
3.2.3.1. Fonction de réponse .....	54
3.2.3.2. Fonction de transfert .....	54
3.2.3.3. Identification des années de sécheresse .....	55
3.3. Résultats .....	55
3.3.1. Chronologie .....	55
3.3.1.1. Sensibilité .....	57
3.3.1.2. Autocorrélations .....	58
3.3.1.3. Corrélations .....	58
3.3.1.4. Synchronisme des deux chronologies .....	58
3.3.2. Reconstitution des précipitations .....	60
3.3.2.1. Fonction de réponse .....	60
3.3.2.2. Fonction de transfert .....	65
3.3.2.3. Identification des années de sécheresse .....	66
3.4. Discussion .....	69
3.5. Conclusion .....	70

## **Quatrième chapitre: Facteurs de dépérissement du cèdre dans l'Aurès. Approche sylvicole**

4.1. Introduction .....	72
4.2. Méthodologie .....	74
4.2.1. Echantillonnage .....	74
4.2.2. Données récoltées .....	74
4.2.3. Paramètres calculés .....	74
4.2.3.1. Surface terrière à l'hectare .....	74
4.2.3.2. Diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne .....	75
4.2.3.3. Densité à l'hectare .....	75
4.2.3.4. Taux de mortalité .....	75
4.2.3.5. Taux d'écorçage .....	75
4.2.3.6. Indices de compétition .....	75
4.3. Résultats et discussion .....	77
4.3.1. Structure des peuplements .....	77
4.3.2. Relations mathématiques .....	78
4.3.3. Relation mortalité-compétition .....	78
4.3.3.1. A l'échelle de l'arbre .....	78
4.3.3.2. A l'échelle du peuplement .....	80
4.3.4. Relation mortalité-Ecorçage .....	81
4.3.4.1. A l'échelle de l'arbre .....	81
4.3.4.2. A l'échelle du peuplement .....	82
4.3.5. Mortalité-compétition-écorçage .....	82
4.3.6. Analyse multi-variable (analyse en composantes principales) .....	83
4.4. Conclusion .....	87
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>88</b>
<b>Références bibliographiques</b>	

# LISTE DES FIGURES

## Introduction

Figure 1. Reliques de cédraies dans l'Aurès .....	01
Figure 2. Dépérissement du cèdre de l'Atlas dans l'Aurès .....	03

## Premier chapitre: Milieu physique

Figure 1.1. Moyenne mobile des précipitations par période de 10 ans .....	12
Figure 1.2. Moyenne mobile des températures moyennes annuelles par période de 10 ans .....	13
Figure 1.3. Diagramme ombrothermique moyen de Bagnouls et Gaussen .....	14
Figure 1.4. Fréquence des mois secs ( $P < 2T$ ) .....	15
Figure 1.5. Fréquence du nombre de mois secs par année ( $P < 2T$ ) .....	15
Figure 1.6. Fréquence du nombre de mois secs successifs ( $P < 2T$ ) .....	16
Figure 1.7. Moyenne mobile du nombre de mois secs ( $P < 2T$ ) de la saison printanière et estivale .....	17
Figure 1.8. Moyenne mobile du nombre de mois secs ( $P < 2T$ ) par année.....	17
Figure 1.9. Bilan climatique .....	19
Figure 1.10. Fréquence du nombre de mois secs ( $P < ETP$ ) par année .....	19
Figure 1.11. Fréquence du nombre de mois secs ( $P < ETP$ ) successifs .....	20
Figure 1.12. Projection de la station de Batna et des cédraies de l'Aurès dans le climagramme d'Emberger .....	21

## Deuxième chapitre: Répartition spatiotemporelle du cèdre dans l'Aurès. Approche par l'analyse pédoanthracologique

Figure 2.1. Localisation des profils pédoanthracologiques .....	25
Figure 2.2. Schéma synthétique de la méthode pédoanthracologique .....	26
Figure 2.3. Procédés d'extraction des charbons .....	28
Figure 2.4. Colonne de tri par lévigation .....	30
Figure 2.5. Nettoyage individuel des charbons dans de l'eau aux ultrasons .....	31
Figure 2.6. Trois plans de coupes dans le bois .....	32
Figure 2.7. Représentation schématique tridimensionnelle des principaux éléments anatomiques d'un bois de dicotylédones .....	33
Figure 2.8. Représentation schématique tridimensionnelle des principaux éléments anatomiques d'un bois de conifères .....	34
Figure 2.9. Charbon de cèdre vu en plan radial montrant les éléments diagnostiques d'un champ de croisement .....	35
Figure 2.10. Fragments de charbons extraits du niveau V du profil Aurès 1 .....	37

Figure 2.11. Anthracomasse spécifique par horizon des différents types de sol échantillonnés .....	38
Figure 2.12. Anthracomasse spécifique moyenne des différents types de sol échantillonnés .....	39
Figure 2.13. Aurès 1, Theniet Boudaoud (Dj. Zellatou) .....	40
Figure 2.14. Aurès 2, Tizi-N'Tssiouanine (Dj. Zellatou) .....	41
Figure 2.15. Outil préhistorique en silex extrait du niveau III du profil Aurès 2 .....	43
Figure 2.16. Aurès 3 (Dj. Mehmel) .....	44
Figure 2.17. Aurès 4, Ras-Tadjine (pinède des Beni-Imloul) .....	45
Figure 2.18. Aurès 5, Ras-Bignoun (pinède des Beni-Imloul) .....	46
Figure 2.19. Aurès 6, 6 bis (Dj. Djehfa) .....	48

### **Troisième chapitre: Reconstitution de la sécheresse dans l'Aurès. Approche dendroclimatologique**

Figure 3.1. Localisation des sites d'échantillonnage .....	52
Figure 3.2. Chronologie résiduelle régionale et nombre de carottes .....	56
Figure 3.3. Moyenne mobile des sensibilités par période de 50 ans .....	57
Figure 3.4. Autocorrélations de la chronologie standard au seuil de signification 0.05 .....	58
Figure 3.5. Moyenne mobile des coefficients de corrélation par période de 50 ans .....	59
Figure 3.6. Evolution de l'indice de croissance des deux chronologies pour la période 1971-2010 .....	59
Figure 3.7. Résultats de la fonction de réponse à l'aide du programme DENDROCLIM .....	60
Figure 3.8. Corrélations entre les précipitations et les températures mensuelles .....	61
Figure 3.9. Corrélations saisonnières entre l'indice de croissance et les facteurs climatiques .....	64
Figure 3.10. Précipitations observées et estimées pour la période 1971-2010 .....	65
Figure 3.11. Précipitations estimées d'octobre à juin pour la période 1455-2010 .....	66
Figure 3.12. Evolution du nombre d'années sèches par période de 50 ans .....	67
Figure 3.13. Moyenne mobile des sévérités de sécheresse par période de 50 ans .....	68

### **Quatrième chapitre: Facteurs de dépérissement du cèdre dans l'Aurès. Approche sylvicole**

Figure 4.1. Mutilations de l'écorce .....	72
Figure 4.2. Contraste dans une même station entre deux bouquets de cèdres, l'un totalement dépéris avec des mutilations d'écorce, et l'autre bien venant croissant sur dalle calcaire fissurée sans mutilations d'écorce .....	73
Figure 4.3. Répartition des arbres par classes des diamètres .....	77

Figure 4.4. Evolution du taux cumulé de mortalité en fonction de l'indice de croissance .....	79
Figure 4.5. Taux de mortalité des arbres concurrencés et compétitifs .....	79
Figure 4.6. Indice de compétition CCF de peuplement .....	80
Figure 4.7. Taux d'écorçage des arbres morts et vivants .....	81
Figure 4.8. Taux d'écorçage des peuplements .....	82
Figure 4.9. Mortalité-compétition-écorçage .....	83
Figure 4.10. Cercle de corrélations .....	85
Figure 4.11. Projection des peuplements dans le plan factoriel (1 x 2) .....	85
Figure 4.12. Peuplement jeune témoin (bien portant) à Taâfist (Feraoun, Ouled-Yaâgoub) malgré une compétition et une densité très élevées .....	86

## LISTE DES TABLEAUX

### **Deuxième chapitre: Répartition spatiotemporelle du cèdre dans l'Aurès. Approche par l'analyse pédoanthracologique**

Tableau 2.1. Caractéristiques des profils pédoanthracologiques .....	25
--	----

### **Troisième chapitre: Reconstitution de la sécheresse dans l'Aurès. Approche dendroclimatologique**

Tableau 3.1. Caractéristiques écologiques des sites et taille d'échantillonnage .....	51
---	----

Tableau 3.2. Principaux paramètres statistiques et dendrochronologiques de l'indice de croissance .....	56
--	----

Tableau 3.3. Corrélations saisonnières entre l'indice de croissance et les précipitations comme facteur primaire .....	62
---	----

Tableau 3.4. Corrélations saisonnières entre l'indice de croissance et les températures comme facteur primaire .....	63
---	----

### **Quatrième chapitre: Facteurs de dépérissement du cèdre dans l'Aurès. Approche sylvicole**

Tableau 4.1. Coefficients de dissymétrie et d'aplatissement et limites d'acceptation des diamètres à 1.30 m du sol .....	77
---	----

Tableau 4.2. Critères de précision et de validité des relations $D_{1.30}-D_{0.30}$ et $D_{\text{houpp}}-D_{1.30}$ .....	78
---	----

Tableau 4.3. Matrice des corrélations des variables initiales .....	84
---	----

# Introduction

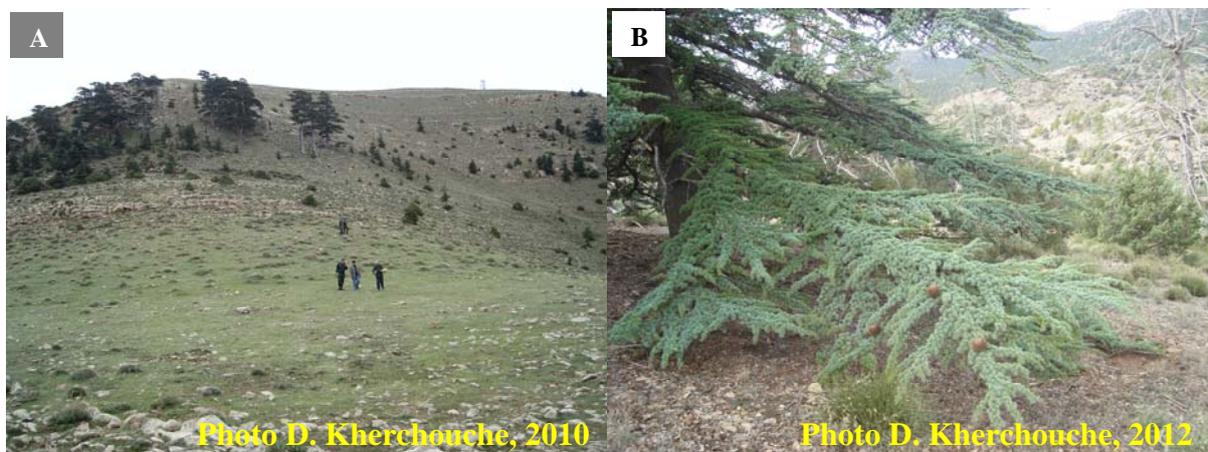
## INTRODUCTION

Le cèdre de l'Atlas, espèce unique du genre *Cedrus* présente en Afrique du Nord, est considéré comme l'espèce noble par excellence pour ses qualités esthétiques, ses intérêts économiques et écologiques. L'importance de cette espèce a été démontrée par son introduction en dehors de sa région d'origine comme en France où sa superficie actuelle est d'environ 20000 ha (Toth, 1990 ; Courbet, 2012).

C'est au Maroc que le cèdre de l'Atlas occupe les plus grandes superficies avec 133000 ha répartis entre le Moyen Atlas, le Haut Atlas oriental, le Rif et le massif de Tazzekka (M'hirit, 2008).

En Algérie les peuplements de cèdre occupent environ 27000 ha répartis par ordre d'importance entre le Belezma, l'Aurès, le Hodna, le Djurdjura, l'Atlas Blidéen, les Babors et l'Ouarsenis (B.N.E.D.E.R, 2010).

Dans l'Aurès les cédraies les mieux conservées sont celles des Ouled-Yaâgoub et du Chelia avec une superficie de 5884 ha (B.N.E.D.E.R, 2010) où le cèdre se trouve à l'état pur ou en mélange avec le chêne vert. Au Sgag le cèdre forme la cédraie à *Juniperus thurifera* avec 500 ha. Des reliques de cédraies dégradées se trouvent à Dj. Azreg avec une superficie de 200 ha (Abdessemed, 1981), Dj. Ichmoul et Dj. Taghda (Fig. 1). Dans cette forêt, les longues basses branches des arbres (Fig. 1-B) attestent de l'état de dégradation et la densité très faible des peuplements depuis longtemps.



**Figure 1:** Reliques de cédraies dans l'Aurès. A: Ichmoul. B: Taghda.

Il est probable que la répartition actuelle du cèdre de l'Atlas dans l'Aurès ne peut totalement correspondre à son aire naturelle en raison de l'action de l'homme qui, depuis l'époque néolithique pratique l'élevage et l'agriculture en Afrique du Nord (Camps, 1974 ; Roubet, 1979) d'une part et des contraintes environnementales d'autre part. Une nouvelle méthode d'investigation de la végétation ligneuse du passé, la pédoanthracologie, adaptée au contexte de l'étude, offre la possibilité de connaître la nature des peuplements végétaux ligneux exploités et modifiés par l'homme au cours des derniers millénaires.

Le phénomène de dépérissement du cèdre, actuellement observé dans son aire d'origine et qui risque de compromettre sa disparition, peut être l'un des facteurs de dégradation et de régression de l'aire naturelle de cette espèce.

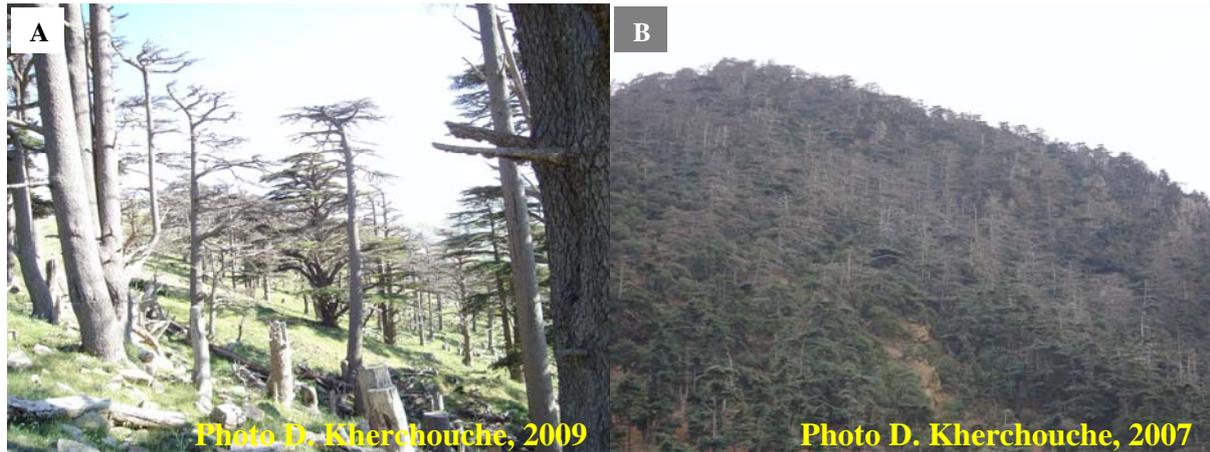
Au Maroc, des milliers d'hectares ont dépéris et d'autres sont en voie de dépérissement (M'hirit, 2008 ; Rhanem, 2011).

Suite à la complexité du phénomène de dépérissement et à la multitude des facteurs pouvant être mis en jeu, un travail multidisciplinaire faisant l'objet d'une convention FAO a été réalisé dans les massifs d'Azrou et Ait Youssi Ameka. Les principaux objectifs de ce travail consistent à caractériser le lien des causes et des symptômes pouvant expliquer le phénomène de dépérissement dans la région et définir une stratégie de gestion et de protection de la cédraie sous forme d'outils de gestion à court, à moyen et à long terme. Ce travail a intégré des spécialistes de différentes disciplines.

Dans un rapport de synthèse de ces travaux établi par M'hirit (2008), il a été conclu que le phénomène de dépérissement dans la zone d'étude passe par deux phases qui se succèdent dans le temps: une première phase marquée par le dysfonctionnement des peuplements de cèdre suite aux sécheresses récurrentes associées à l'absence d'une sylviculture. Dans la seconde phase, le processus de dépérissement se déclenche, amplifié par l'effet du stress hydrique sur des stations défavorables (sols superficiels sur pentes et expositions chaudes).

En dehors de ce projet d'autres travaux ont été réalisés dont on peut citer Zine El Abidine (2003) et Ettobi (2006).

En Algérie, durant la dernière décennie, les cédraies de l'Aurès et du Belezma ont souffert d'un dépérissement inquiétant (Fig. 2) avec un taux de mortalité alarmant qui dépasse parfois les 90 % (cas du Mont Boumerzoug, Parc National du Belezma).



**Figure 2:** Dépérissement du cèdre de l'Atlas dans l'Aurès. A: Chelia. B: Ouled-Yaâgoub.

Il est à signaler que ce phénomène de dépérissement n'est pas nouveau dans ces massifs. Deux épisodes à très forte mortalité ont été signalés dans les différentes cédraies de la région. Selon De Lartigue (1904) et Boudy (1952 ; 1955), le premier épisode a eu lieu suite à une sécheresse ayant frappé la région entre 1872 et 1882 et a été marqué par une mortalité de 1/3 des arbres, les 2/3 restants étaient constitués d'arbres vieux en voie de dépérissement. Ces auteurs ont attribué ce phénomène à une sévère sécheresse combinée à un froid très rigoureux en 1879, année très froide et sèche même en Europe (Lamb, 1977). Le second épisode a eu lieu, selon Abdessemed (1981), en 1979 suite à une sécheresse très intense où les précipitations annuelles ont atteint un niveau correspondant à 50 % de la moyenne annuelle.

Suite à ce phénomène qui constitue encore la préoccupation majeure des chercheurs et des gestionnaires forestiers, une rencontre scientifique a été organisée en 2006 à Batna dont le but était d'expliquer les causes probables du dépérissement et de dégager des pistes de recherche. La conclusion retenue est que le phénomène de dépérissement est le résultat de plusieurs facteurs qui peuvent agir soit en concomitance soit successivement provoquant ainsi l'affaiblissement voire la mort de l'arbre. Selon Manion (1981) in Gärtner (1987) et M'hirit (2008), ces facteurs sont classés en trois catégories:

- facteurs prédisposants: âge des arbres, potentiel génétique, changements climatiques...
- facteurs déclenchants: sécheresse, attaques d'insectes défoliateurs...
- facteurs aggravant: insectes xylophages, champignons parasites...

Malgré les intérêts du cèdre de l'Atlas et la sévérité du problème de dépérissement, très peu d'études ont été menées pour tenter d'expliquer le mécanisme de ce phénomène en rapport avec le stress hydrique (Halitim, 2006), l'entomologie (Beghami, 2010 ; Talbi, 2010)

et la télédétection et SIG (Beloula, 2010), mais aucun travail multidisciplinaire n'a été réalisé ni envisagé.

Afin de diagnostiquer ce phénomène dans des peuplements n'ayant jamais fait l'objet d'une sylviculture et face aux changements climatiques actuels, le présent travail consiste à étudier deux aspects. Le premier concerne la reconstitution de la sécheresse comme facteur le plus plausible de ce dépérissement (Bentouati et Bariteau, 2006 ; Bentouati, 2008 ; Touchan et *al.*, 2008 a ; Allen et *al.*, 2010). Le second a trait au problème de compétition entre les arbres et quelques facteurs sylvicoles pouvant être en relation avec la mortalité.

Aussi nous nous proposons de structurer le présent travail en quatre chapitres:

Le premier chapitre est consacré au contexte de l'étude, dans lequel seront caractérisées les différentes composantes physiques du milieu d'étude qui peuvent nous éclairer de la plate forme sur laquelle évolue le couvert végétal et particulièrement la cédraie.

Dans le deuxième chapitre, afin de retracer l'aire ancienne du cèdre, il nous a paru intéressant d'utiliser l'approche pédoanthracologique pour tenter de retrouver, dans le passé, des traces d'une extension plus importante de l'aire locale du cèdre.

Dans le troisième chapitre, nous allons reconstituer les périodes de sécheresse à l'échelle séculaire en adoptant une approche paléoécologique, la dendroclimatologie. Cette discipline, qui utilise les cernes de croissance des arbres comme archives des données climatiques, va nous permettre de vérifier le rapprochement entre les périodes de sécheresse identifiées et les épisodes de dépérissement du cèdre déjà signalés dans la région. Nous allons aussi analyser l'évolution temporelle des différents aspects de la sécheresse ; fréquence, période et sévérité.

Enfin, pour faire un diagnostic du phénomène de dépérissement, nous allons étudier dans le quatrième chapitre la relation entre les conditions de mortalité et de quelques facteurs sylvicoles. Dans ce chapitre l'accent sera mis sur le phénomène de compétition entre les arbres et l'âge des peuplements.

# **Premier chapitre**

## **Milieu physique**

## 1.1. Localisation géographique du massif de l'Aurès

L'Aurès ou *Mons Aurasius* des latins ou Ourès des berbères, prolongement Est de l'Atlas Saharien, est un assemblage de plusieurs montagnes les plus escarpées de l'Afrique du Nord (Laffitte, 1939). Selon Gautier in Laffitte (1939), l'Aurès est la seule région de l'Afrique du Nord qui a conservé son nom depuis l'époque romaine sans interruption. C'est la région la plus élevée dans le Nord de l'Algérie avec une altitude de 2328 m (Ras-Keltoum, Chelia). Il est limité:

- à l'Ouest par le couloir synclinal de Batna qui le sépare du massif du Belezma
- au Nord par la plaine de Timgad
- à l'Est par les Monts des Nememchas
- au Sud par la plaine de Biskra

## 1.2. Géologie

Le seul document relatif à la géologie de l'Aurès est le travail de Laffitte (1939) à partir duquel nous reprenons de très larges extraits. Trois ères sont représentés: le secondaire sur lequel s'étend la totalité des cédraies, le tertiaire et le quaternaire.

### 1.2.1. Secondaire

#### 1.2.1.1. Trias

Cet étage affleure sous forme de gypse et de sel gemme accompagnés de marnes bariolées. Selon Abdessemed (1981), cet étage se situe sur les flancs des anticlinaux portant du cèdre. On le trouve à Mâafa, Khenchela, Menâa, Medina, Tarzout à Rioul, Ain-Taga.

#### 1.2.1.2. Lias (Toarcien)

Très peu représenté, cet étage affleure sous forme de schistes tendres emballés dans les marnes à gypses des environs de Menâa.

#### 1.2.1.3. Jurassique (Kimeridgien, Portlandien, Berriasien)

Il s'observe au Djebel Azreg où la totalité de la montagne est formée d'une énorme masse de dolomies. Au Djebel Taghda, dans la partie inférieure il affleure sous forme de calcaires marneux, vers la partie supérieure, les calcaires sont de plus en plus dolomités et la masse principale du Djebel est formée uniquement de dolomies avec des alternances de marnes et de calcaires au dessus sur le versant Nord.

#### **1.2.1.4. Crétacé**

Le Crétacé est l'étage le plus développé, représenté par deux séries:

- Le Crétacé inférieur où les grès forment le faciès dominant. Il comporte aussi des marnes et parfois des calcaires mais en lentilles. Il va du Valanginien à l'Albien.
- Le Crétacé supérieur de faciès marno-calcaire qui va du Cénomaniens au Danien.

#### **A. Crétacé inférieur**

##### **A1. Valanginien**

Cet étage affleure uniquement dans l'anticlinal du Djebel Azreg où il forme une ellipse autour de l'affleurement du Jurassique.

##### **A2. Hauterivien**

Limité au cœur de l'anticlinal du Djebel Azreg, cet étage dessine une auréole régulière formant autour des dépressions marneuses du Valanginien, des escarpements calcaires ou gréseux.

##### **A3. Barrémien**

Le faciès est bien développé dans le centre et le Nord du massif, mais vers le Sud-Ouest, s'intercalent des marnes rouges, violettes, ocracées, des bancs de grès moins bien cimentés devenant sableux et des bancs de gypse. Vers le Nord-Est, la série est plus marine et des calcaires s'observent à la base.

Dans l'anticlinal du Djebel Azreg, à Tizi-Ahmar, le faciès est gréseux avec des marnes bariolées qui deviennent de plus en plus nombreuses vers le sommet.

Dans l'anticlinal d'Ichmoul-Chelia, le Barrémien apparaît sous forme de quartzites sur le versant Est du Djebel Ichmoul et sous forme de grès dans les ravins du versant Sud du Chelia.

Dans l'anticlinal de Khenchela, le Barrémien affleure au Djebel Feraoun et Djebel Aidel sous forme de grès.

##### **A.4. Aptien**

Sur les flancs de l'anticlinal du Djebel Azreg, l'Aptien affleure sous forme de calcaires et de marnes. Au sommet du Djebel Boutlarmine, se trouve un banc de dolomie noirâtre.

Dans l'anticlinal d'Ichmoul-Chelia, à Ichmoul la base se charge de grès tandis qu'au sommet des marnes s'intercalent. Au Chelia, cet étage affleure sous forme de grès sur une grande partie avec des dolomies dans la partie supérieure. Sur le flanc Sud, des dalles de calcaires dolomitiques s'intercalent avec des bancs dolomitiques.

Dans l'anticlinal de Khenchela, à Aïn-Taga, l'étage affleure sous forme d'alternances de marnes et de calcaires. Au Djebel Feraoun, sur le versant Sud, près de la ligne de crête, des calcaires avec des intercalations marneuses s'observent. Sur le versant Nord se trouvent des lentilles de calcaires.

### **A.5. Albien**

Il existe dans tous les anticlinaux de l'Aurès où il couronne régulièrement les assises du Crétacé inférieur. Il se présente sous forme de faciès gréseux grossier, se distinguant facilement des grès des étages inférieurs le plus souvent très fins. Latéralement les grès passent à des alternances de marnes et de quartzites dans le Nord-Est du massif, et des couches de marnes bariolées, des grès rouges dans le Sud-Ouest. Les calcaires sont rares à la base et la partie moyenne de l'étage, et deviennent fréquents dans la partie supérieure.

Dans l'anticlinal de l'Ahmar Khadou, au Sud du Djebel Taktiout, l'étage affleure sous forme de couches de calcaires.

A Ichmoul, à la base on trouve des alternances de grès et de marnes noires avec de rares intercalations calcaires. Dans la partie supérieure, les grès deviennent moins fréquents et les bancs de calcaires gris clair deviennent plus épais et plus nombreux et au dessus viennent des calcaires noirâtres. Au Chelia, le faciès flysh envahit à peu près tout l'étage, les calcaires ne subsistent que dans la partie Nord-Ouest de la montagne. Dans le reste, ils sont réduits à de minces intercalations parmi des grès et des marnes.

Au Sud de l'anticlinal de Khenchela, à Aïn-Guiguel, l'Albien est représenté par des alternances de marnes noires et de grès, puis des calcaires massifs. A Chentgouma, le faciès marno-gréseux se charge de grès au détriment de marnes. A Aïn-Mimoun, sur le versant Nord, le faciès devient plus marneux.

## **B. Crétacé supérieur**

### **B1. Cénomanién**

Cet étage affleure sous forme d'un faciès généralement marneux à la base puis marno-calcaire dans la partie supérieure. Sous cette forme, l'étage forme le versant Nord d'Ich-Ali.

A Iggedlène le cœur est formé des marnes, puis des calcaires viennent au dessus.

Dans l'anticlinal de l'Ahmar-Khaddou, l'étage forme la grande dépression qui s'étend sur le versant Sud du massif au pied des escarpements calcaires de Taktiout.

Dans l'anticlinal du Djebel Azreg, l'étage est très développé vers le Nord-Est en continuité avec l'anticlinal d'Ichmoul-Chelia puis de Khenchela sur une bande de 130 Km de long.

Dans l'anticlinal d'Ichmoul-Chelia, sous la même forme précédente, le Cénomaniens affleure au Nord de la plaine de Medina à Bouleghmène.

Dans l'anticlinal de Khenchela, l'étage forme une ceinture à peu près continue sur tout le pourtour, il est interrompu seulement au Sud de Khenchela par un appointement triasique et recouvert par le quaternaire. Cet étage s'observe aussi à Aïn-Boudjoraf et à Djebel Taâfist où des marnes forment la base et des calcaires le sommet de la montagne.

Dans l'anticlinal de Tafelna, cet étage est observé sous forme d'un faciès calcaro-marneux. A Asslef El-Ahmane ; au Sud-Est du Djebel Forar, le faciès est très voisin de celui observé dans l'anticlinal de l'Ahmar-Khaddou ; des alternances de marnes et de calcaires à la base puis des calcaires massifs au dessus.

## **B2. Turonien**

C'est l'étage du Crétacé dont ses affleurements occupent les surfaces les plus grandes de l'Aurès notamment au Nord-Ouest du massif, entre les anticlinaux d'Ich-Ali et d'Iggedlène sur lesquels s'étend la forêt des Ouled-Fedhala (Abdessemed, 1981) et au Sud de l'anticlinal du Chelia.

A Ich-Ali, sur le versant Nord, l'étage se trouve sous forme de calcaires à la base et des marnes au sommet. Sur le versant Sud, il forme tout le synclinal compris entre l'anticlinal d'Ich-Ali et celui d'Iggedlène où il affleure sous forme des alternances de marnes et de calcaires à la base et des lentilles de calcaires au sommet.

Dans l'anticlinal du Djebel Azreg, le Turonien forme une auréole régulière à la périphérie, interrompue seulement vers le Sud-Ouest par le Trias de Menâa, intrusif, l'Oligocène et le Miocène transgressif. Au Sud-Ouest, le faciès est calcaire tandis qu'au centre et vers l'Est, il devient marneux.

Dans le Sud-Ouest de l'anticlinal de l'Ahmar-Khaddou, l'étage est représenté par des calcaires massifs. Au Djebel Taktiout, des escarpements calcaires intercalés de marnes constituent la masse de la montagne.

Dans l'anticlinal d'Ichmoul-Chelia, le faciès est marneux avec une assise calcaire qui apparaît localement à la partie supérieure.

### **B3. Sénonien et Danien**

Le Sénonien existe dans tous les synclinaux de l'Aurès. La partie supérieure de l'étage est formée généralement de calcaires massifs. Les calcaires maestrichtiens forment le Djebel Mehmel. Cet étage affleure au centre du synclinal de Ain-Touta et autour des anticlinaux d'Iggenlène, du Djebel Azreg, de l'Ahmar-Khaddou et du Djebel Chechar.

#### **1.2.2. Tertiaire**

##### **1.2.2.1. Nummulitique**

Le Nummulitique est bien représenté dans l'Aurès. Il se trouve dans tous les synclinaux. Il se divise en deux séries: marine (Eocène inférieur et Eocène moyen) et continentale (Eocène supérieur et Oligocène).

##### **A. Série marine**

C'est dans le Sud-Est de l'Aurès, dans la région du Djebel Chechar que le Nummulitique est le plus développé. Il s'observe aussi au Nord de Séiar et à Khenguet Sidi-Nadji. Il forme tout le centre du synclinal de Ghassira. Dans les gorges de M'Chounech (Taghit Timsounine), il se présente sous forme de calcaires à silex à la base et des calcaires avec quelques bancs marneux dans la partie supérieure. A Ghoufi il se présente sous forme de calcaires à la base et de marnes à la partie supérieure. A Zellatou, le Nummulitique est le plus anciennement connu de l'Afrique du Nord où il est caractérisé par un ensemble marno-calcaire et gypseux à la base puis des calcaires gypseux à la partie supérieure.

##### **B. Série continentale**

Dans le synclinal de Ghassira, ainsi que celui de Bouzina, à la base se trouvent des marnes rouges, et des poudingues au dessus. Les poudingues inférieurs sont calcaires, tandis que les poudingues supérieurs sont gréseux contenant des galets de grès.

Dans le synclinal d'El-Kantara, le faciès est analogue au précédent, des marnes gréseuses à la partie inférieure et des poudingues à la partie supérieure.

Dans les autres points, des poudingues reposent directement sur des couches plus anciennes.

### **1.2.2.2. Néogène (Miocène et Pliocène)**

Le néogène est bien développé dans les plaines de la périphérie de l'Aurès.

#### **A. Néogène inférieur (Miocène inférieur)**

C'est sur les bords Nord et Ouest du massif que le Miocène prend de l'importance.

Au Nord, dans le bassin de Timgad, il constitue une série d'affleurements continus depuis Batna jusqu'à Khenchela. Dans le Nord-Ouest, le faciès est calcaire, tandis qu'au Nord-Est, les grès deviennent plus fréquents et épais.

Dans les vallées de l'Aurès, à Menâa, le Miocène affleure sous forme de molasses à la partie inférieure puis des marnes vertes à l'Ouest et des conglomérats à très gros éléments au Nord à la partie supérieure. A Nerdî, des argiles rouges à gypses s'intercalent avec des marno-calcaires.

#### **B. Néogène supérieur (Miocène supérieur et Pliocène)**

C'est dans le Sud de l'Aurès que le Néogène continental est le plus développé. Autour de l'oasis de Khenguet Sid-Nadji, la série est représentée par des argiles rouges à la base, des grès rouges à la partie moyenne et des poudingues à gros éléments du Pliocène à la partie supérieure.

Dans le centre de l'Aurès, le Néogène supérieur est représenté dans le synclinal de Bouzina, à Nerdî et Rdam, sous forme de couches rouges. Au Nord du massif, la série continentale du Néogène constitue le remplissage du bassin de Timgad par des couches rouges, surtout aux environs de Sidi-Mâansar.

### **1.2.3. Quaternaire**

Les terrains du quaternaire sont largement répandus à la périphérie de l'Aurès et deviennent rares dans le centre où ils sont représentés par des éboulis et des terrasses. Les éboulis sont importants au pied des crêtes de calcaires maestrichtiens avec de gros blocs pouvant atteindre jusqu'à 20 m de diamètre sur le versant Nord (Malou) du Djebel Mehmel.

## **1.3. Types de sols**

Peu d'études des sols de l'Aurès ont été menées (Schoenenberger, 1970 ; Abdessemed, 1981) à partir desquels nous retenons les groupes suivants:

- Les sols bruns peu calcaires localisés essentiellement sur les grès du Barrémien, de l'Aptien et de l'Albien.

- Les sols bruns calcaires localisés sur les marnes et les calcaires du Cénomaniens, du Turonien et du Lias (moyen et supérieur) avec deux faciès: sol brun calcaire typique et sol brun presque totalement décalcarisé en surface.
- Les rendzines et rendzines dolomitiques.

## **1.4. Climat**

Pour l'étude du climat, nous avons retenu les données enregistrées à la station météorologique de Batna sur une période de 82 ans (1930-2011) pour les précipitations et de 62 ans (1950-2011) pour les températures. En 1988, la station a été déplacée à Ain-Skhouna à une altitude de 821 m avec une différence d'altitude de 231 m par rapport à l'ancien emplacement, Batna ville (1052 m). Pour harmoniser les données nous avons extrapolé celles enregistrées à Ain-Skhouna pour l'altitude de 1052 m en utilisant les gradients mensuels altitudinaux établis par M'hirit (M'hirit, 1982) pour l'Aurès.

### **1.4.1. Précipitations**

La moyenne des précipitations annuelles pour la période 1930-2011 est de 363 mm. Le régime pluviométrique saisonnier est de type PHAE: P = printemps (Mar-Avr-Mai), H = hiver (Déc-Jan-Fév), A = automne (Sep-Oct-Nov), E = été (Jun-Jul-Août).

#### **1.4.1.1. Gradients pluviométriques**

- Les gradients pluviométriques altitudinaux disponibles pour la région de l'Aurès sont:
- Deux gradients annuels établis par Abdessemed (1981) pour 100 m de dénivelée, qui varient selon le versant, 20 mm pour le versant Sud et 40 mm pour le versant Nord.
  - Des gradients mensuels établis par M'hirit (M'hirit, 1982).

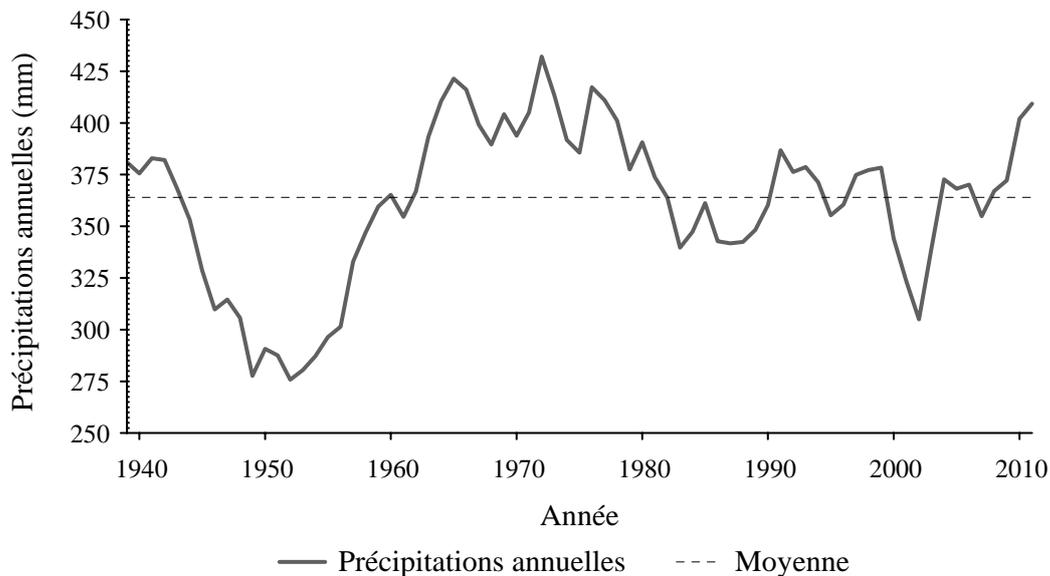
#### **1.4.1.2. Tendances des précipitations**

La figure 1.1 fait ressortir une succession de cycles humides et de cycles froids. Ce que nous remarquons sur ce graphique c'est que les cycles secs puis humides se suivent et sont approximativement d'égales durées, 20 ans, 10 ans puis 5-6 ans:

- 1941-1960, cycle d'années sèches de 20 ans
- 1961-1980, cycle d'années humides de 20 ans
- 1981-1990, cycle d'années sèches de 10 ans
- 1991-2000, cycle d'années humides de 10 ans
- 2001-2005, cycle d'années sèches de 5 ans

- 2006-2011, cycle d'années humides de 6 ans

Cette cyclicité n'est pas uniforme tout au long de la période puisque d'un cycle d'une durée de 20 ans (1941-1960 et 1961-1980) on aboutit à un cycle d'une durée de 5-6 ans (2001-2005 et 2006-2011). Durant les derniers 50 ans, la quantité moyenne des précipitations a tendance à diminuer, ce qui dénote d'un assèchement progressif du climat.



**Figure 1.1:** Moyenne mobile des précipitations par période de 10 ans. Station de Batna (1930-2011).

## 1.4.2. Températures

La température moyenne annuelle de la région est de l'ordre de 13.7 °C. La moyenne des minima du mois le plus froid (janvier) est de 0.06 °C, celle des maxima du mois le plus chaud (juillet) est de 35.6 °C. Ces températures sont cependant susceptibles d'atteindre des valeurs extrêmes de l'ordre de -11 °C pour le mois de janvier, 1954 et 43.8 °C pour le mois de juillet, 2005. Ces écarts importants entre les basses et les hautes températures sont susceptibles d'être extrêmement nocifs aux végétaux.

### 1.4.2.1. Gradients thermiques

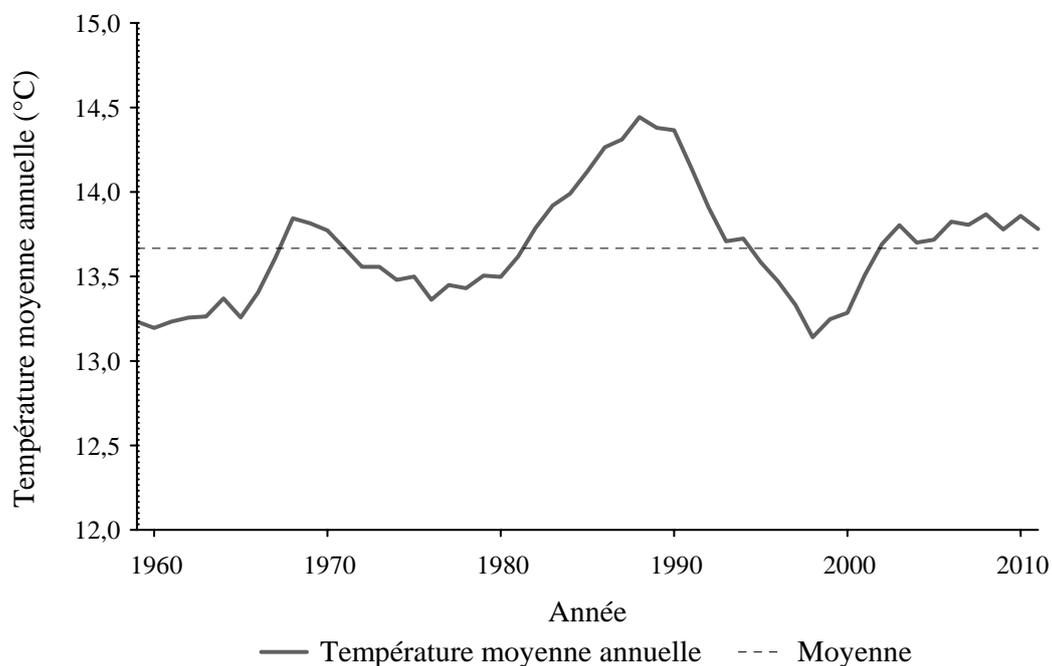
Les gradients thermiques altitudinaux disponibles sont:

- Gradients de Seltzer (1946) pour 100 m de dénivelée: -0.70 °C pour les maxima du mois le plus chaud et -0.45 °C pour les minima du mois le plus froid.
- Gradients mensuels établis par M'hirit (M'hirit, 1982).

### 1.4.2.2. Tendence des températures moyennes annuelles

La figure 1.2 montre que les températures moyennes annuelles ne sont pas elles mêmes stables d'année en année avec une succession de cycles froids et chauds par rapport à la normale annuelle. Entre 1960 et 1965, l'année dans son ensemble a été fraîche, il y a ensuite réchauffement entre 1966 et 1972, suivi d'un cycle d'années fraîches (1973-1980).

Entre 1981 et 1993 on assiste à une hausse sensible de la température qui atteint en 1988 une valeur de 14,5 °C. A partir de 1993, les températures se sont de nouveau rafraîchies (13,2 °C en 1998).



**Figure 1.2:** Moyenne mobile des températures moyennes annuelles par période de 10 ans. Station de Batna (1950-2011).

Il y'a une tendance générale à l'augmentation de la valeur moyenne annuelle des températures de l'ordre d'un degré. Cette hausse qui, à première vue, paraît négligeable peut présenter un danger réel pour la végétation en région semi-aride surtout si elle est conjuguée à une baisse de l'humidité.

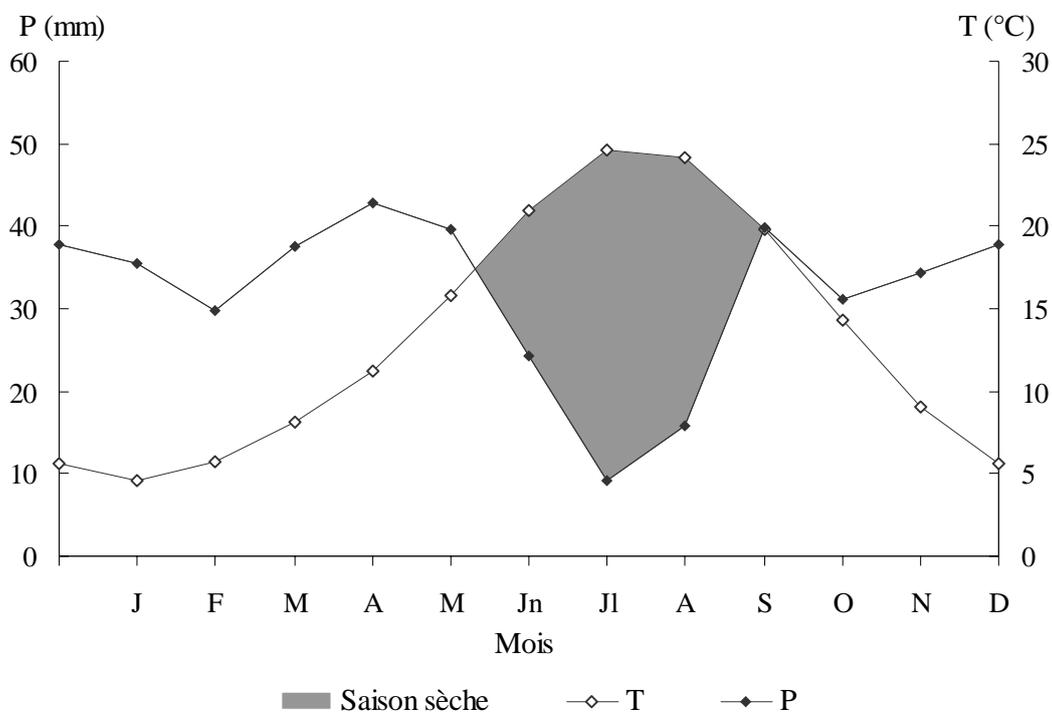
### 1.4.3. Sécheresse climatique

Nous avons étudié la sécheresse climatique à travers deux rapports,  $P < 2T$  et  $P < ETP$ .

#### 1.4.3.1. Rapport $P < 2T$

##### A. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

Le diagramme ombrothermique moyen de Bagnouls et Gaussen fait apparaître une période de sécheresse climatique qui s'étale de la deuxième décennie du mois de juin jusqu'à la fin septembre (Fig. 1.3). Cette période, confinée certes aux mois d'été, peut toucher les autres mois, même ceux d'hiver ou de printemps, mais d'une manière occasionnelle ou accidentelle (El-Jihad, 2003) avec des fréquences beaucoup plus basses.



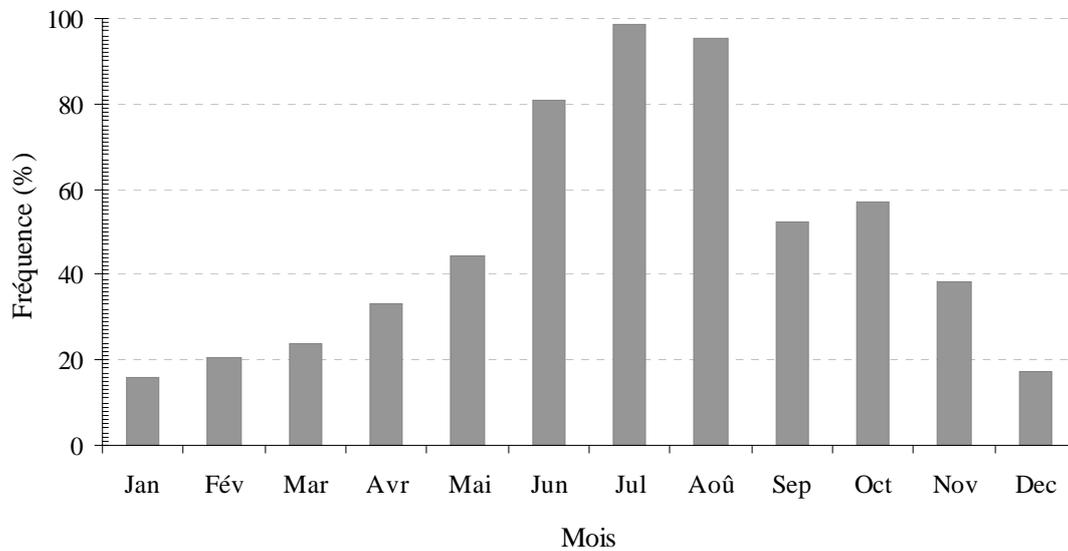
**Figure 1.3:** Diagramme ombrothermique moyen de Bagnouls et Gaussen. Station de Batna (1950-2011).

##### B. Approche fréquentielle de la sécheresse $P < 2T$

###### B1. Fréquence des mois secs

L'approche fréquentielle du rapport  $P < 2T$  met en évidence le risque de sécheresse hydrologique de chaque mois de l'année. La figure 1.4 montre que les mois d'été sont quasiment toujours secs avec des fréquences entre 80 et 100 % pour les mois de juin, juillet et août, suivis par les mois d'automne avec une fréquence de 40 à 60 %, puis les mois du

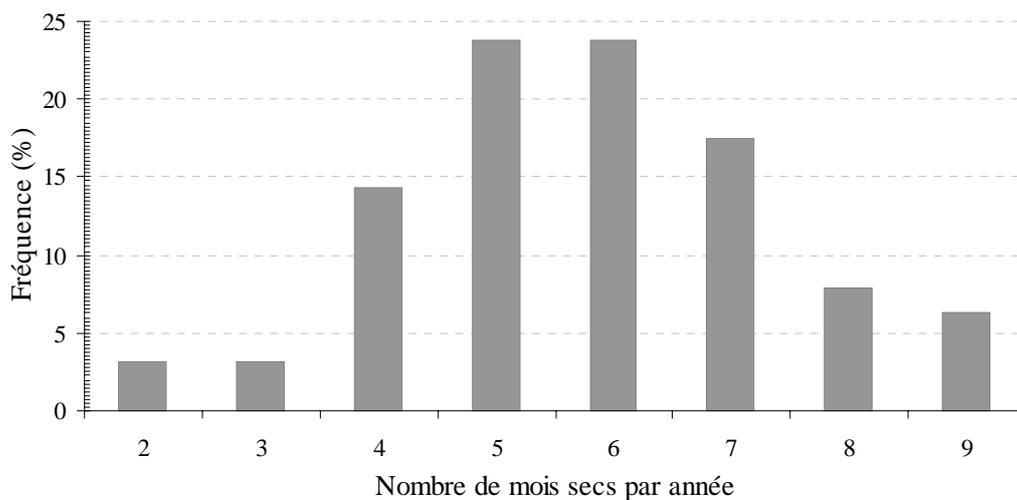
printemps avec une fréquence de 20 à 40 %. Les mois d'hiver sont aussi touchés par cette sécheresse mais avec une fréquence ne dépassant pas les 20 %.



**Figure 1.4:** Fréquences des mois secs ( $P < 2T$ ). Station de Batna (1950-2011).

## B2. Nombre de mois secs par année

Pour la période 1950-2011, on constate que le nombre de mois secs par année varie entre 2 et 9 (Fig. 1.5). Cependant, ce qui est plus fréquent est une sécheresse de 5-6 mois. Les années avec 9 mois secs sont: 1961, 1966, 1988 et 2000, celles avec 8 mois secs sont: 1977, 1978, 1981, 1983 et 2002.

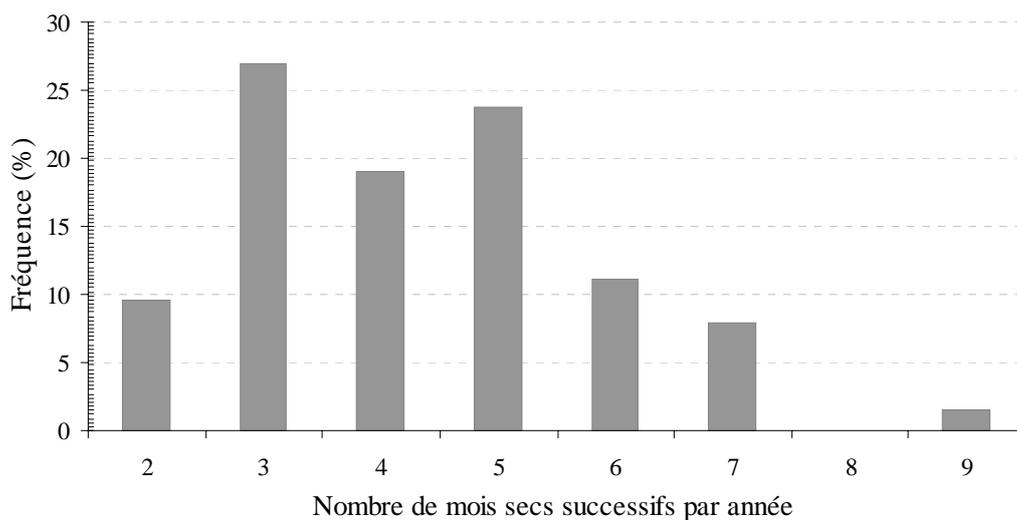


**Figure 1.5:** Fréquence du nombre de mois secs par année ( $P < 2T$ ). Station de Batna (1950-2011).

Le coefficient de corrélation entre les précipitations annuelles et le nombre de mois secs par année a montré une bonne corrélation entre ces deux variables avec une valeur de -0.80. Cela signifie que 64 % des années ont soit de faibles précipitations avec un nombre élevé de mois secs ou inversement. Ceci indique une bonne répartition des pluies dans l'année.

### B3. Succession de mois secs

En plus de la fréquence des mois secs par année, la durée de la sécheresse exprimée par la succession des mois secs est un aspect important à étudier. Pour la période 1950-2011, le nombre de mois secs successifs varie de 2 à 9 mois (Fig. 1.6). Cependant, ce qui est plus fréquent est une sécheresse de 3-5 mois successifs. 1961 est l'année la plus défavorable avec 9 mois secs successifs (février-octobre), suivie des années 1954, 1988, 1993, 1996 et 2000 avec 7 mois successifs de sécheresse.

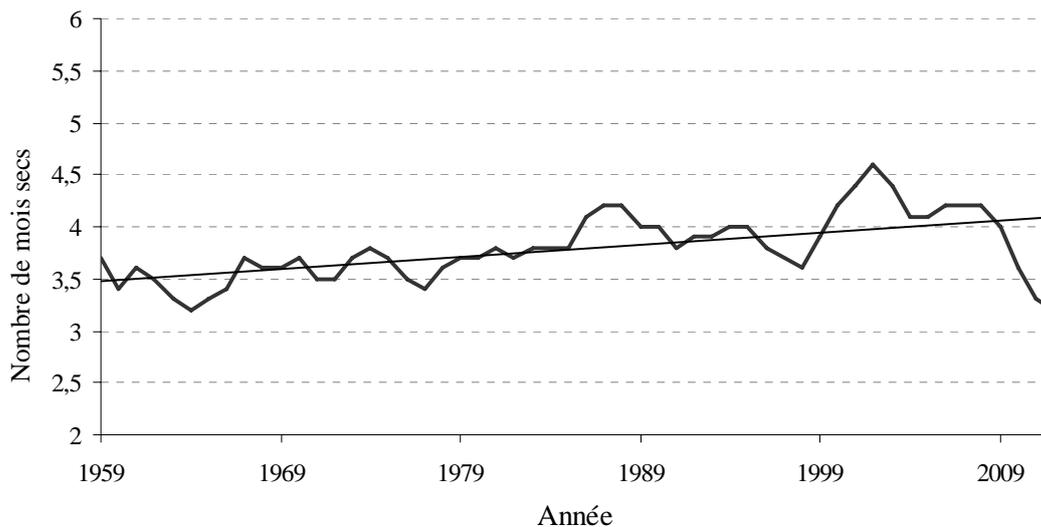


**Figure 1.6:** Fréquence du nombre de mois secs successifs ( $P < 2T$ ).  
Station de Batna (1950-2011).

### B4. Tendance du nombre de mois secs

Concernant la tendance du nombre de mois secs, les graphiques (Fig. 1.7 et 1.8) font ressortir une allure conforme aux courbes des précipitations et des températures.

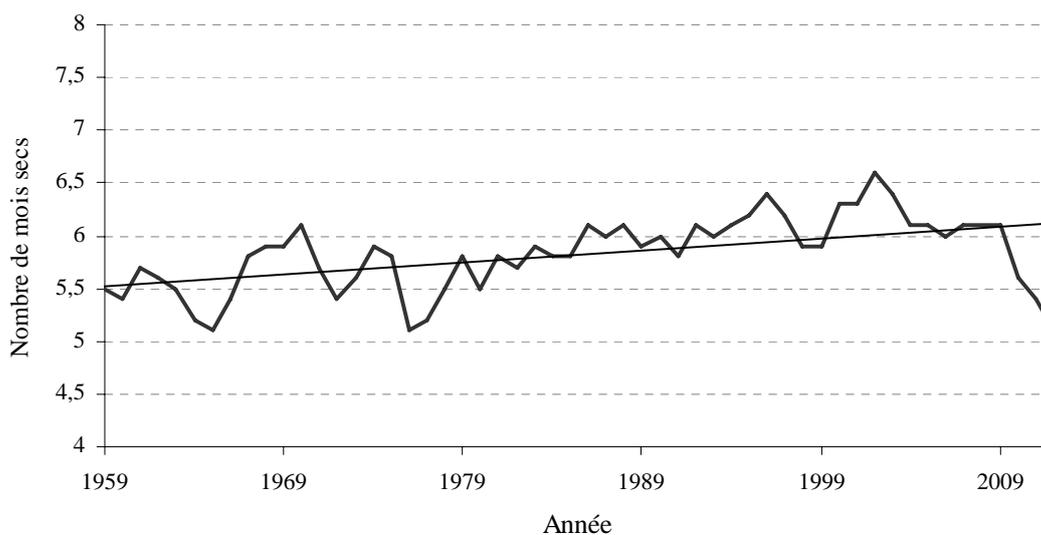
Pour la saison printanière et estivale (mars-août) (Fig. 1.7) et pour la période 1950-2011, on constate que la moyenne mobile du nombre de mois secs ( $P < 2T$ ) est en constante augmentation (de 3 mois et demi à 4 mois avec un pic d'à peu près 4 mois et demi en 2002).



**Figure 1.7:** Moyenne mobile du nombre de mois secs ( $P < 2T$ ) de la saison printanière et estivale. Station de Batna (1950-2011).

La même tendance s'observe en analysant la figure 1.8 relative à la moyenne mobile du nombre de mois secs par année pour la même période. On constate en effet que la tendance moyenne est à l'augmentation (de 5 mois et demi en 1960 à plus de 6 mois en 2009) avec un pic dépassant 6 mois et demi de sécheresse en 2002.

Cette tendance montre l'irrégularité des saisons climatiquement sèches dans le temps (1950-2011) et l'amplitude qui est observée, puisqu'on passe de 5 mois en 1965 et 1976 à plus de 6 mois et demi en 2002.



**Figure 1.8:** Moyenne mobile du nombre de mois secs ( $P < 2T$ ) par année. Station de Batna (1950-2011).

### 1.4.3.2. Rapport P<ETP

#### A. Bilan climatique

Pour l'ETP (évapotranspiration potentielle), nous avons appliqué la formule de Thornthwaite (Bouteldjaoui et *al.*, 2012) selon laquelle l'ETP d'une région est fonction de la température et peut être exprimée comme suit:

$$ETP = 16.C \left( \frac{10t}{I} \right)^a$$

- ETP = évapotranspiration potentielle (mm)
- C = facteur de correction qui dépend du temps (mois) et du lieu (latitude). Les valeurs de ce facteur sont données par des tables.
- $t$  = température moyenne mensuelle en degrés Celsius.
- $a$  = indice lié à la température. Il est calculé par la relation simplifiée par Serra (1954) in (Halimi, 1980) comme suit:

$$a = 0.016I + 0.5$$

- I = l'indice thermique annuel obtenu par la somme des 12 valeurs mensuelles:

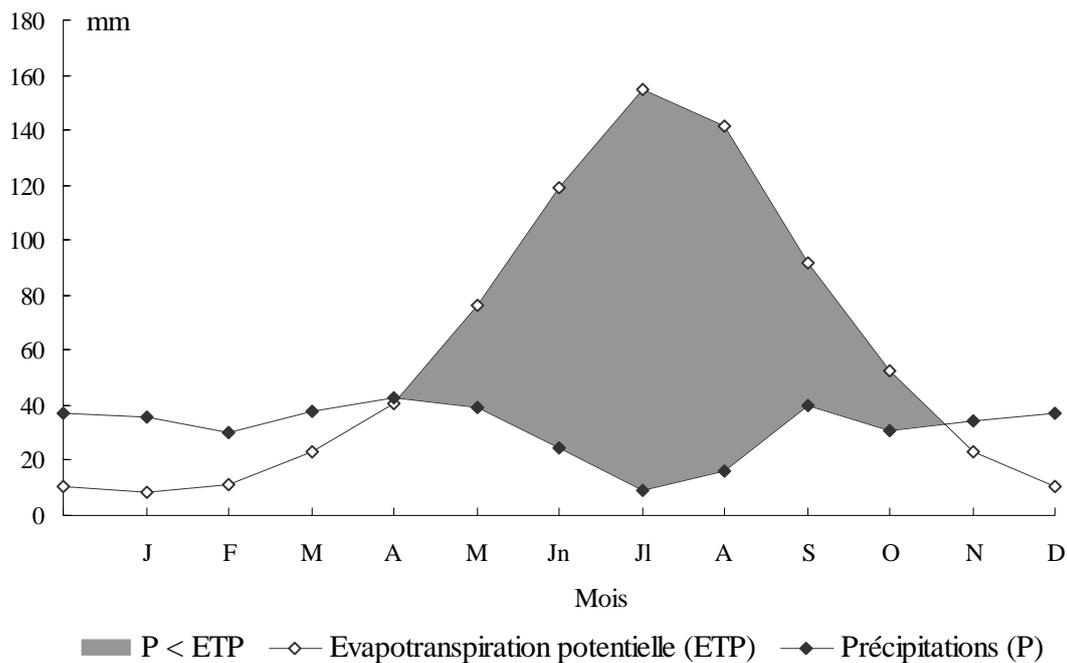
$$I = \sum_{j=1}^{12} \left( \frac{t_j}{5} \right)^{1.514}$$

- $t_j$  est la température moyenne mensuelle en degrés Celsius.

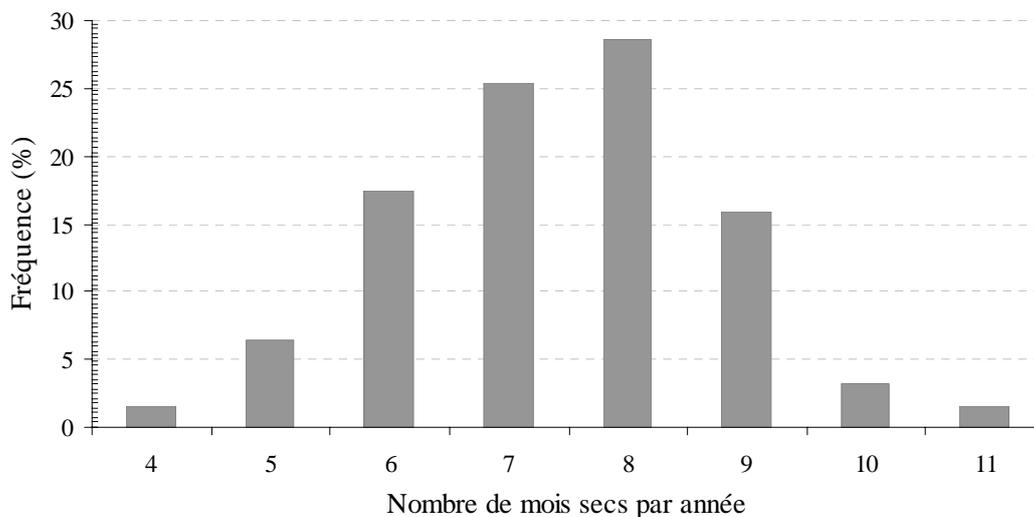
La figure 1.9, relative aux précipitations et à l'évapotranspiration potentielle (ETP), montre que la sécheresse biologique s'étend du mois de mai à la moitié de novembre, ce qui met en exergue la sévérité des conditions d'humidité dans la région.

#### B. Nombre de mois secs (P<ETP)

La figure 1.10 montre la répartition temporelle des mois secs (P<ETP) pour la période 1950-2011. Le nombre de mois secs varie de 4 à 11 avec une abondance d'une sécheresse de 7 à 8 mois. L'année la plus défavorable est l'année 1966 avec 11 mois secs suivie par les années 1988 et 2000 avec 10 mois secs.



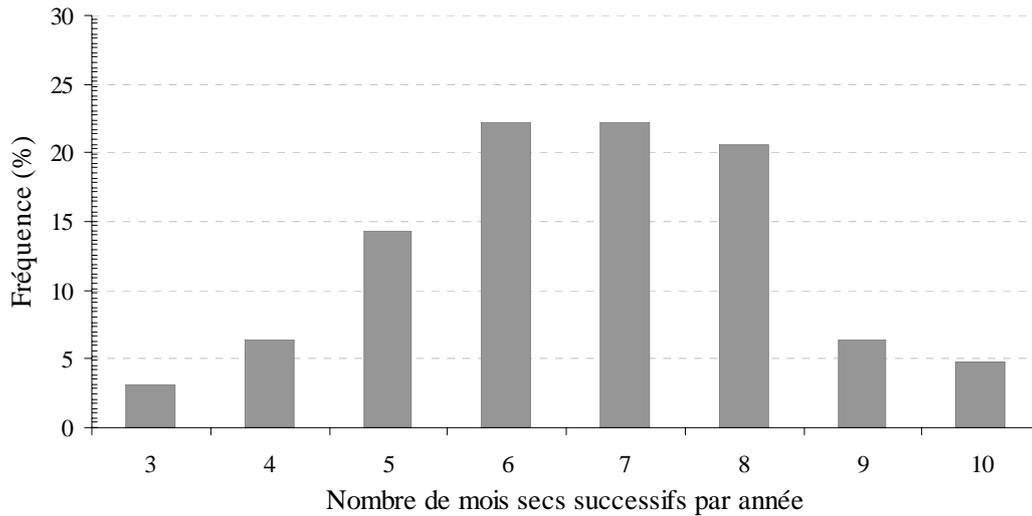
**Figure 1.9:** Bilan climatique. Station de Batna (1950-2011).



**Figure 1.10:** Fréquence du nombre de mois secs ( $P < ETP$ ) par année. Station de Batna (1950-2011).

### C. Nombre de mois secs successifs ( $P < ETP$ )

De la figure 1.11 qui représente la répartition temporelle du nombre de mois secs successifs pour la période 1950-2011, on constate que le nombre de mois secs successifs varie de 3 à 10 avec une fréquence élevée de 6 à 8 mois. Le nombre de mois secs successifs le plus élevé, 10 mois est enregistré en 1966, 1988 et 2000.



**Figure 1.11:** Fréquence du nombre de mois secs ( $P < ETP$ ) successifs. Station de Batna (1950-2011).

#### 1.4.4. Climagramme d'Emberger

Il s'agit d'une formule où la valeur des précipitations est divisée par une expression de la température. Pour Emberger (1930), cette température doit être choisie en fonction de la vie du végétal et sa préférence va à la demi-somme de la moyenne des maxima du mois le plus chaud ( $M$ ) et de la moyenne des minima du mois le plus froid ( $m$ ). Au dénominateur, il introduit l'amplitude annuelle moyenne ( $M - m$ ), ce qui donne:

$$Q_2 = \frac{1000P}{\frac{M+m}{2}(M-m)} \quad \text{soit } Q_2 = \frac{2000P}{M^2 - m^2}$$

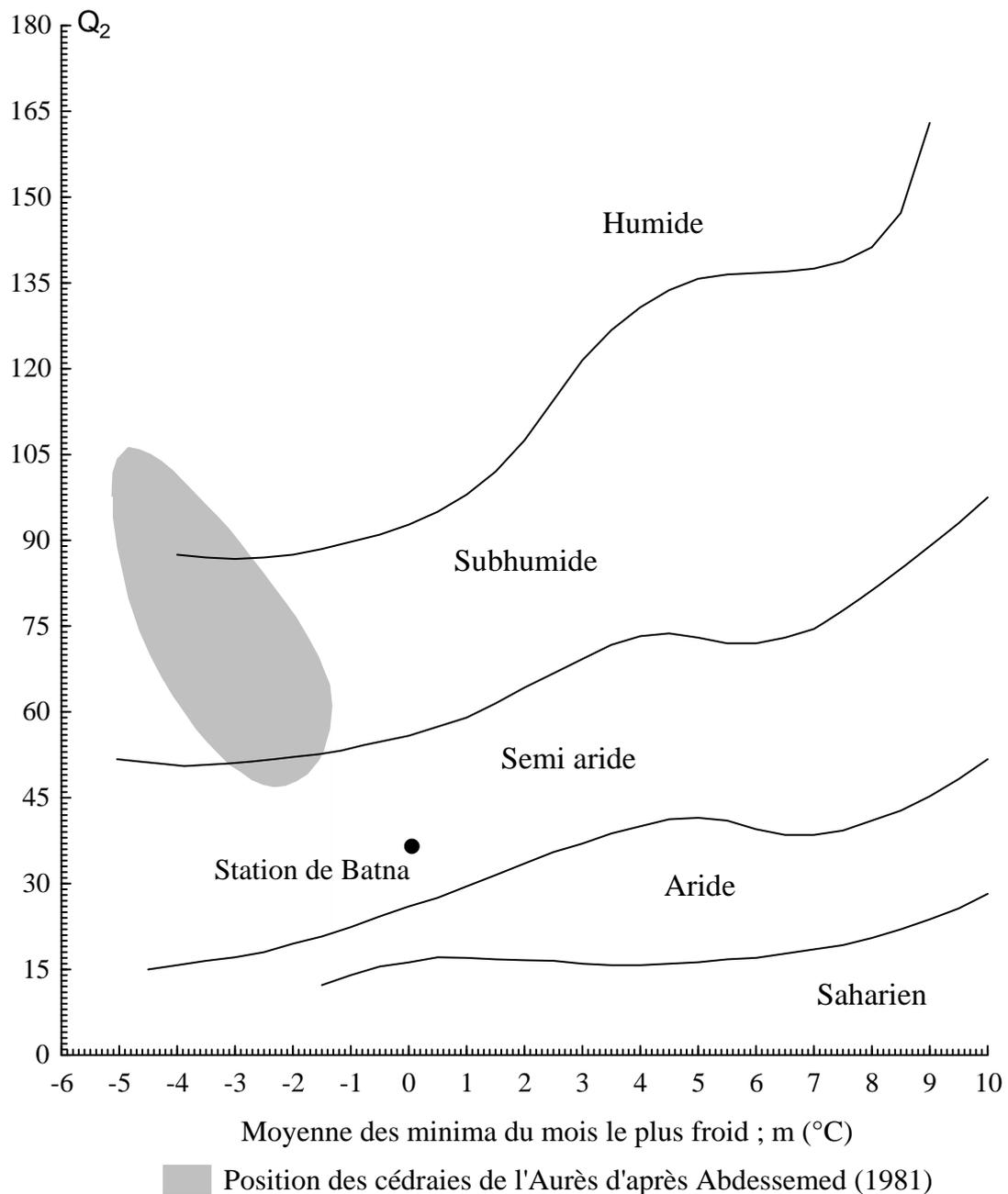
Les précipitations sont exprimées en mm et les températures en degrés Kelvin.

Stewart (1969) a montré que cette formule peut s'écrire de la manière suivante:

$$Q_2 = \frac{1000}{\frac{(M+m)}{2} + 273} \times \frac{P}{M-m} \quad (M \text{ et } m \text{ en degrés Celsius})$$

Il a constaté que le premier terme peut être assimilé à une constante  $k = 3.43$  en raison de la faible variation de cette fraction pour les pays de l'Afrique du Nord. Les valeurs de  $Q_2$  trouvées à l'aide de la nouvelle formule sont très peu différentes des valeurs calculées avec la formule originale, l'erreur maximale n'atteint que 1.7 %.

Sur la figure 1.12, montrant la projection des cédraies de l'Aurès dans le climagramme d'Emberger, on constate que la majorité des cédraies se trouvent dans l'étage subhumide froid. Selon Abdessemed (1981), l'étage humide froid est représenté par les cédraies des sommets du Chelia et du Djebel Feraoun (Ouled-Yaâgoub), tandis que l'étage semi-aride froid est représenté par les cédraies du Djebel Taghda et Djebel Azreg.



**Figure 1.12:** Projection de la station de Batna et des cédraies de l'Aurès dans le climagramme d'Emberger.

## 1.5. Conclusion

Il ressort de l'étude climatique que nous sommes en présence d'un climat méditerranéen continental franchement montagnard à deux saisons tranchées, l'une pluvieuse et froide, l'autre sèche et chaude.

La pluviométrie est irrégulièrement répartie aussi bien d'année en année qu'annuellement avec une succession de périodes humides et sèches de plus en plus courtes.

La température annuelle moyenne a montré une tendance générale à l'augmentation de l'ordre d'un degré, avec des cycles chauds et froids.

L'approche fréquentielle de la sécheresse ( $P < 2T$ ) montre que la saison estivale est la plus sèche chaque année. Durant cette saison les végétaux de la région souffrent de la conjugaison d'un manque d'humidité et une hausse des températures. Les autres mois de l'année peuvent connaître des sécheresses occasionnelles mais avec des fréquences beaucoup plus basses.

## **Deuxième chapitre**

# **Répartition spatiotemporelle du cèdre dans l'Aurès: Approche par l'analyse pédoanthracologique**

## 2.1. Intérêt de la méthode

Les écosystèmes forestiers ont été profondément modifiés au cours de plus de 7 millénaires d'exploitation et il est aujourd'hui difficile de cerner la véritable nature des formations végétales potentielles, en équilibre avec les facteurs climato-édaphiques ainsi que biologiques.

L'une des plus anciennes et la plus répandue des disciplines phytohistoriques est la palynologie qui étudie les grains de pollen et les spores conservées dans les milieux anoxiques humides. Cependant, cette méthode est peu adaptée aux régions sèches, en raison de la rareté des sites favorables. Une seconde discipline, l'anthracologie, s'intéresse aux charbons de bois contenus dans les sols et sédiments avec une résolution spatiale beaucoup plus locale. Cet outil phytohistorique se subdivise en deux disciplines, l'archéoanthracologie et la pédoanthracologie (Pons et Thinon, 1987).

L'archéoanthracologie, la plus ancienne, étudie les charbons de bois rencontrés dans un contexte archéologique, en liaison avec des sites d'habitat humain. Il s'agit des restes de foyers ou de structures d'habitations incendiées. Son champ historique débute avec la maîtrise du feu par l'homme, soit plus de 400000 ans. Sa résolution spatiale correspond à l'aire de récolte du bois au voisinage de l'habitat. Cette aire, primitivement réduite, s'est progressivement étendue avec la sédentarisation et l'apparition de moyens de transport. L'archéoanthracologie a connu un développement assez important au 20<sup>ème</sup> siècle en Algérie, avec notamment les travaux de Saint-Laurent (1934), Le Dû et Saccardy (1948) et Couvert (1969 ; 1970 ; 1977).

La pédoanthracologie, d'origine plus récente (Thinon, 1978 ; 1992), est fondée sur l'étude des fragments de charbon de bois contenus dans la plupart des sols de la planète. Ces charbons, rencontrés à l'écart des habitats humains proviennent d'incendies de la végétation, soit naturels, soit beaucoup plus fréquemment, associés aux pratiques agro-pastorales. Les charbons sont progressivement enfouis dans les sols sous l'action de la sédimentation et de l'activité biologique, tout en subissant généralement une fragmentation qui peut conduire à leur disparition. Le charbon de bois est par contre très résistant vis-à-vis de l'altération biologique ou chimique et peut se conserver longtemps dans le sol. Moyennant quelques précautions d'ordre topographique, la précision peut atteindre quelques mètres à quelques dizaines de mètres, soit l'échelle de la station. La carbonisation respecte les structures anatomiques du bois d'origine, ce qui permet l'identification botanique des charbons.

La précision taxinomique atteint généralement le rang générique et assez souvent celui de l'espèce, selon la finesse de l'analyse anthraco-anatomique.

On doit remarquer que la dispersion des charbons de bois par les courants convectifs générés par les incendies et le vent est très faible (Thinon, 1992 ; Clark, 1988 in Marguerie *et al.*, 2010 ; Ohlson et Tryterud, 2000 in Marguerie *et al.*, 2010). A ce propos, Thinon (1992) paraît avoir abordé systématiquement la distinction des particules carbonisées (débris d'écorce et de feuilles) du véritable bois secondaire au sens anatomique et conclut que les charbons identifiables contenus dans les sols n'ont pas subi de transports aériens significatifs latéraux ou en altitude, les transports vers l'aval restant possibles.

Les charbons, par rapport aux grains de pollen, peuvent être directement datés par le taux de radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ ). Dans le cas de la pédoanthracologie, la très faible masse des charbons nécessite la méthode de datation par spectrométrie de masse par accélérateur. Les informations recueillies portent généralement sur les 4 à 5 derniers millénaires, mais peuvent parfois remonter aux débuts de la néolithisation et au-delà, soit 8 à 10000 ans.

Cette discipline a déjà apporté quelques résultats en Afrique du Nord, notamment au Maroc et en Tunisie. Dans le système atlasique marocain, de vastes espaces aujourd'hui asylvatiques étaient autrefois boisés par le chêne vert ou le chêne zéen (Thinon et Alifriqui, 2003). En Tunisie, la steppe à alfa de la région de Kasserine dérive d'une formation de chêne vert (Thinon, 1992). Il nous a paru intéressant d'utiliser cette méthode pour tenter de retrouver, dans le passé, des traces d'une extension plus importante de l'aire locale du cèdre.

## 2.2. Choix des stations

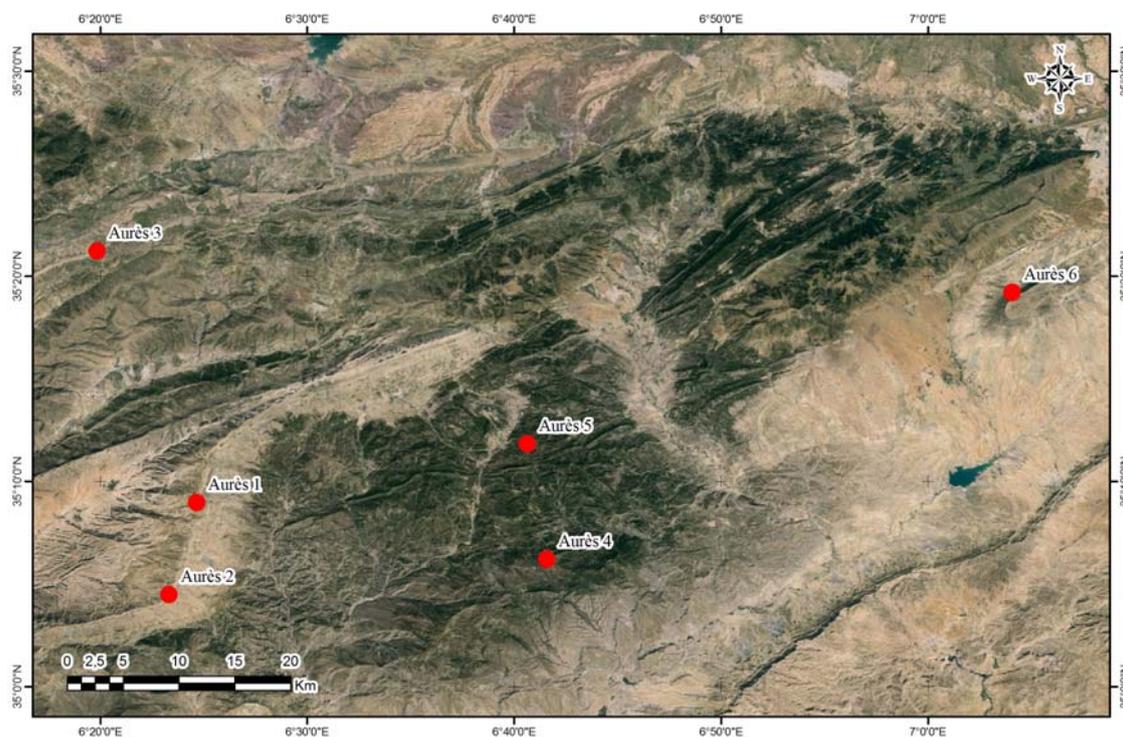
Le choix de la station est avant tout guidé par des considérations écologiques. On recherchera de préférence les situations se rapprochant le plus de l'horizontal, éloignées d'une pente, sur un sol évolué et profond, non remanié. En montagne ces conditions sont rarement réunies, on cherchera dans la mesure du possible, les zones faiblement déclives, les épaulements, où l'ablation et les apports sont réduits. Les points bas (creux des thalwegs, dépressions) et les pentes collectant les éléments transportés par le ruissellement et faisant l'objet d'apports de sédiments depuis l'amont ou d'ablation au profit de l'aval sont à éviter.

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes limités à l'étude de six stations situées dans les chaînons méridionaux du massif. Nous avons ainsi choisi des sites d'altitudes accessibles dont les conditions écologiques semblent compatibles avec l'existence du cèdre:

- Le Djebel Zellatou, dans la région de T'Kout où l'altitude dépasse 1800 m
- Le Djebel Mehmel, totalement asylvatique où l'altitude atteint 2321 m.

- La crête de la pinède des Beni-Imloul, où deux sites ont été choisis: le Ras-Bignoun dont la toponymie atteste probablement de l'existence du cèdre (Abdessemed, 1984) et Ras-Tadjine où l'altitude avoisine 1700 m.
- Le Djebel Djehfa où l'altitude avoisine 1700 m.

La localisation des profils pédoanthracologiques des stations prospectées est illustrée dans la figure 2.1. Quelques caractéristiques écologiques sont réunies dans le tableau 2.1.



**Figure 2.1:** Localisation des profils pédoanthracologiques.

**Tableau 2.1:** Caractéristiques des profils pédoanthracologiques.

Profil	Altitude (m)	Pente (°)	Exposition	Profondeur (cm)	Nombre d'horizons
Aurès 1 (Dj. Zellatou)	1840	Nulle		90	5
Aurès 2 (Dj. Zellatou)	1690	Nulle		150	7
Aurès 3 (Dj. Mehmel)	1975	24	Sud	170	3
Aurès 4 (Beni-Imloul)	1560	10	Sud	63	3
Aurès 5 (Beni-Imloul)	1580	16	Ouest	120	5
Aurès 6 (Dj. Djehfa)	1505	20	Nord.Ouest	110	5
Aurès 6 bis (Dj. Djehfa)	1540	20	Nord.Ouest	40-70	1

### 2.3. Matériel et méthodes

La méthodologie utilisée a été mise au point par Thinon (Thinon, 1992 ; Carcaillet et Thinon, 1996), la figure 2.2 illustre les différentes étapes de la méthode.

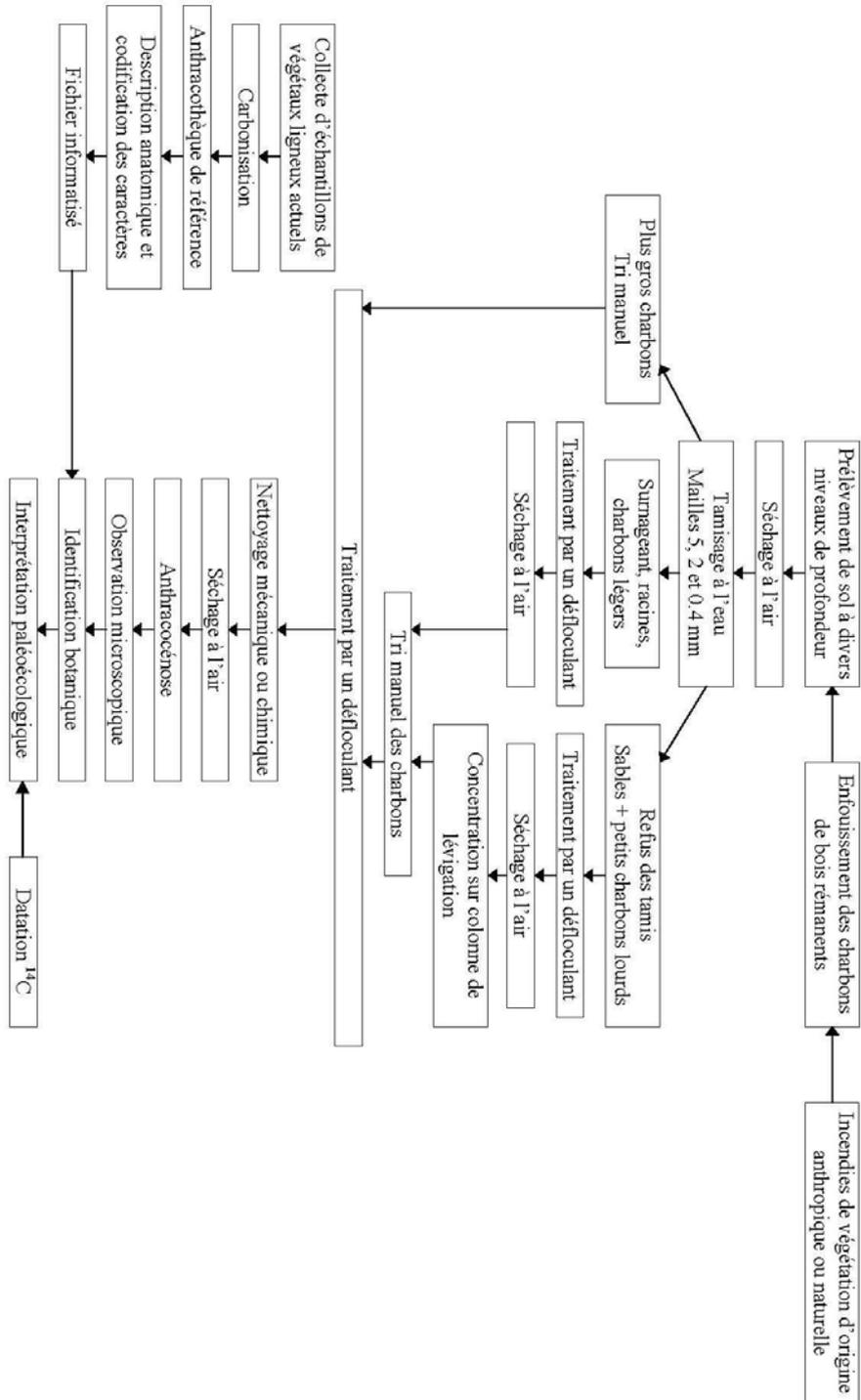


Figure 2.2: Schéma synthétique de la méthode pédoanthracologique d'après Thimon (1992).

### 2.3.1. Prélèvements de terrain

Une fosse pédologique est creusée si possible jusqu'à la roche mère. On peut également profiter d'une coupe déjà réalisée comme par exemple la tranchée d'une piste, dont on rafraîchira le talus. Un croquis annoté relève les caractéristiques pédologiques du profil, ainsi que celles de la végétation et du contexte de la station, accompagné de photographies avec une indication de l'échelle. Les prélèvements (5 à 10 litres de sédiment, selon la richesse apparente en charbons) sont réalisés à plusieurs niveaux, de préférence en fonction des limites des horizons pédologiques, leur nombre étant en relation avec la profondeur du sol. Les prélèvements se font soit en niveaux successifs contigus, soit séparés par un hiatus, à partir de la base de la fosse (afin d'éviter les contaminations par les éléments des niveaux supérieurs). Pour des raisons de poids et d'encombrement, on n'échantillonne pas les cailloux inutiles en tamisant le sédiment sur une maille de 20 mm.

Les prélèvements sont mis dans des sacs étanches (matière plastique) avec une étiquette portant le numéro du profil et de l'horizon. On doit noter qu'au prélèvement, les charbons apparaissent rarement, sauf pour les sols les plus riches en charbon. L'invisibilité des fragments de charbons n'est pas seulement liée à leur petite taille mais aussi aux agrégats incluant ces charbons (Thinon, 1992 ; Marguerie et *al.*, 2010).

### 2.3.2. Traitements au laboratoire

#### 2.3.2.1. Extraction

Tout d'abord les échantillons sont séchés à l'air libre ou bien dans une étuve ventilée à une température ne dépassant pas une cinquantaine de degrés Celsius. Ce séchage permet de renforcer la résistance de nombreux charbons fragilisés par l'humectation et de diminuer leur densité.

L'extraction des charbons à partir du sédiment consiste à réaliser un tamisage ménagé sous l'eau, généralement jusqu'à la maille de 0.4 mm. Le sédiment est d'abord malaxé dans une cuve rotative en acier inoxydable à ailettes remplie d'eau (25 l environ) (Fig. 2.3 A). Le liquide amortit les chocs du brassage afin de préserver les charbons. Cette opération a pour but d'éliminer les agrégats risquant de colmater le tamis de 0.4 mm ; ceux-ci sont progressivement réduits en particules de faible taille mises en suspension. Un surnageant, constitué par de la matière organique (racines pour l'essentiel) et les charbons les plus légers, se forme en surface. On doit noter que pour certains sols, la plupart des charbons ne flottent pas. Le liquide et le surnageant sont alors versés sur un tamis correspondant à la maille

minimale (0.4 mm) (Fig. 2.3 B). L'opération est répétée (3 fois en général) jusqu'à ce que la proportion des agrégats ait fortement régressé.

Le culot de la cuve est ensuite versé sur une colonne de tamis de 5 mm, 2 mm et 0.4 mm (Fig. 2.3 C). Les éléments grossiers ayant un effet destructeur sur les charbons de bois sont retenus par la maille supérieure, tout en laissant passer tous les charbons, sauf cas très exceptionnels. La maille de 2 mm retient les plus gros charbons, facilement visibles et collectables à l'aide d'une pince souple. La maille inférieure de 0.4 mm constitue un bon compromis entre les possibilités de détermination des petits charbons et l'effort d'extraction à partir du sédiment. Les deux dernières mailles retiennent également les derniers agrégats qui peuvent facilement être réduits à l'aide d'un pinceau à poils souples (Fig. 2.3 D).

Les divers refus (à l'exception de ceux de 5 mm) sont traités pendant quelques dizaines d'heures par une solution d'un défloculant sans carbone (hexamétaphosphate de sodium) puis rincés et séchés à l'étuve. Les charbons sont ensuite isolés par un tri manuel sous instrument optique.



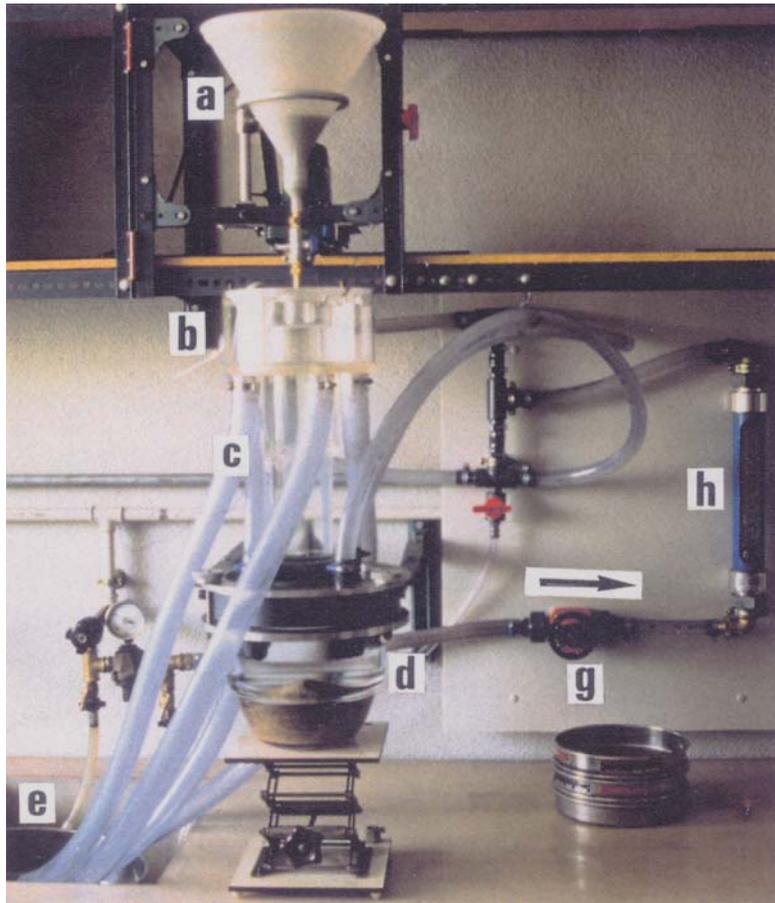
**Figure 2.3:** Procédés d'extraction des charbons. A: malaxage du sédiment. B: Récupération du surnageant. C: Passage du sédiment dans la colonne de tamis. D: Destruction des derniers agrégats.

Les refus minéraux, notamment pour les sols édifiés sur un substrat cristallin, peuvent être très importants et l'extraction manuelle des charbons sous instrument optique s'avère fastidieuse et génératrice de fatigue oculaire. Un enrichissement par un appareil de tri par lévigation ou élutriation permet de réduire cette tâche à des proportions acceptables. Cet appareil conçu par Thinon (1992) (Fig. 2.4) s'inspire des méthodes utilisées dans l'industrie et repose sur le principe d'une sélection des particules en fonction de leur vitesse asymptotique de chute dans un fluide (liée à leur densité et à leur forme, loi de Stokes).

Le procédé de tri consiste à faire chuter, par une trémie vibrante, le sédiment à trier dans un courant d'eau ascendant à l'intérieur d'une colonne verticale. La vitesse ascensionnelle de l'eau, mesurée par un débitmètre, est réglée de telle manière à entraîner les charbons (matériel léger) au sommet de la colonne, tandis que les particules minérales (plus denses) continuent à chuter pour se décanter au fond d'un récipient situé à la base de l'appareil. Les charbons se déversent latéralement dans un collecteur circulaire et sont récupérés dans un tamis de réception. L'évacuation des sables déposés dans le récipient inférieur s'effectue après une vidange du circuit.

La vitesse ascensionnelle de l'eau nécessaire pour entraîner les charbons vers le haut dépend de la taille du sédiment. Il faudra donc au préalable diviser le sédiment à trier en classes de différentes tailles. Les vitesses expérimentalement établies par Thinon (1992) sont par exemple 10.5 cm/s pour sélectionner les charbons de la classe supérieure à 1.25 mm, soit un débit de 1450 l.h<sup>-1</sup> pour la section de l'appareil et 750 l.h<sup>-1</sup> pour ceux de la classe 0.5-0.8 mm. Le matériel isolé est mis à sécher à l'étuve avant un dernier tri manuel.

Il est à signaler que malgré la capacité enrichissante de cette méthode, pouvant réduire 2 kg de sable à moins de 10 g à trier, des minéraux de forme plane comme les micas ou les débris de coquilles de gastéropodes peuvent être récupérés avec les charbons. Cette méthode présente l'avantage de ne pas gêner les datations <sup>14</sup>C par rapport aux méthodes de flottation sur des liqueurs densimétriques contenant du carbone pouvant contaminer le charbon.

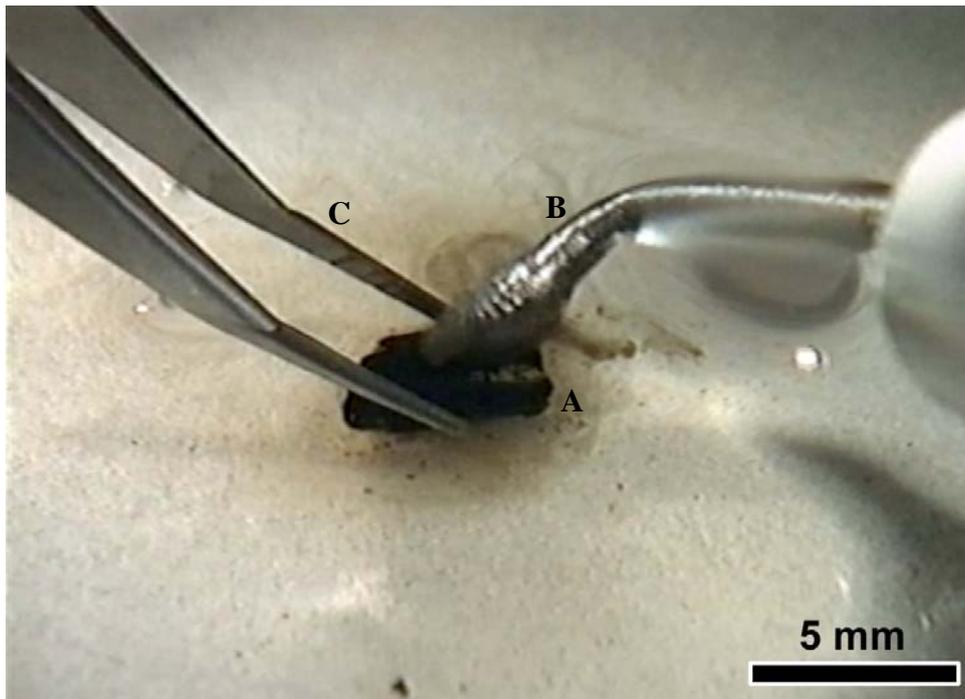


**Figure 2.4:** Colonne de tri par lévigation (Thinon, 1992). a: trémie vibrante d'alimentation, b: collecteur, c: colonne de séparation, d: cuve de réception des éléments lourds, e: tamis de réception des charbons et autres éléments légers, g: vanne de réglage du débit, h: débitmètre. La flèche indique le sens d'écoulement de l'eau.

### 2.3.2.2. Préparation à l'observation microscopique

Les charbons résultant des tris, comme ceux extraits à vue lors du tamisage à l'eau, ne sont généralement pas totalement libérés de leur gangue minérale par le séjour dans la solution de dispersant. Leur préparation est complétée par un nettoyage individuel à l'aide d'un générateur ultrasonique (Fig. 2.5). Les dépôts rebelles et les petits charbons difficilement manipulables peuvent enfin être traités, d'abord par une solution aqueuse d'acide chlorhydrique puis par des solutions concentrées d'acide fluorhydrique et ensuite chlorhydrique à chaud (70°C).

La préparation des plans d'observation microscopique peut se faire, sur les plus gros charbons, par des cassures ou des clivages réalisés à l'aide d'une lame de scalpel, selon les trois plans ligneux.



**Figure 2.5:** Nettoyage individuel des charbons dans de l'eau aux ultrasons.  
A: fragment de charbon, B: système ultrasonique, C: pince.

### 2.3.2.3. Identification, datation des charbons, analyse et présentation des résultats

#### - Identification

En dehors de quelques retraits et déformations de nature et d'amplitude connues, la carbonisation respecte les plus fines structures anatomiques du bois d'origine. L'identification botanique du charbon de bois consiste à reconnaître, par l'observation microscopique des trois plans ligneux: transversal, tangentiel et radial (Fig. 2.6, 2.7 et 2.8), les différents caractères anatomiques du bois carbonisé.

L'observation, réalisée en microscopie épiscopique (grossissements x200, x500 et x1000), se fait directement sur le charbon qui peut, par la suite, être éventuellement daté. Malgré ses hautes performances, le microscope électronique est mal adapté au travail quotidien et les perfectionnements de la microscopie photonique mettent à la disposition de l'observateur des procédés efficaces, facilement utilisables et peu coûteux, comme le contraste interférentiel de Nomarski (Thinon, 1988) (Fig. 2.9).

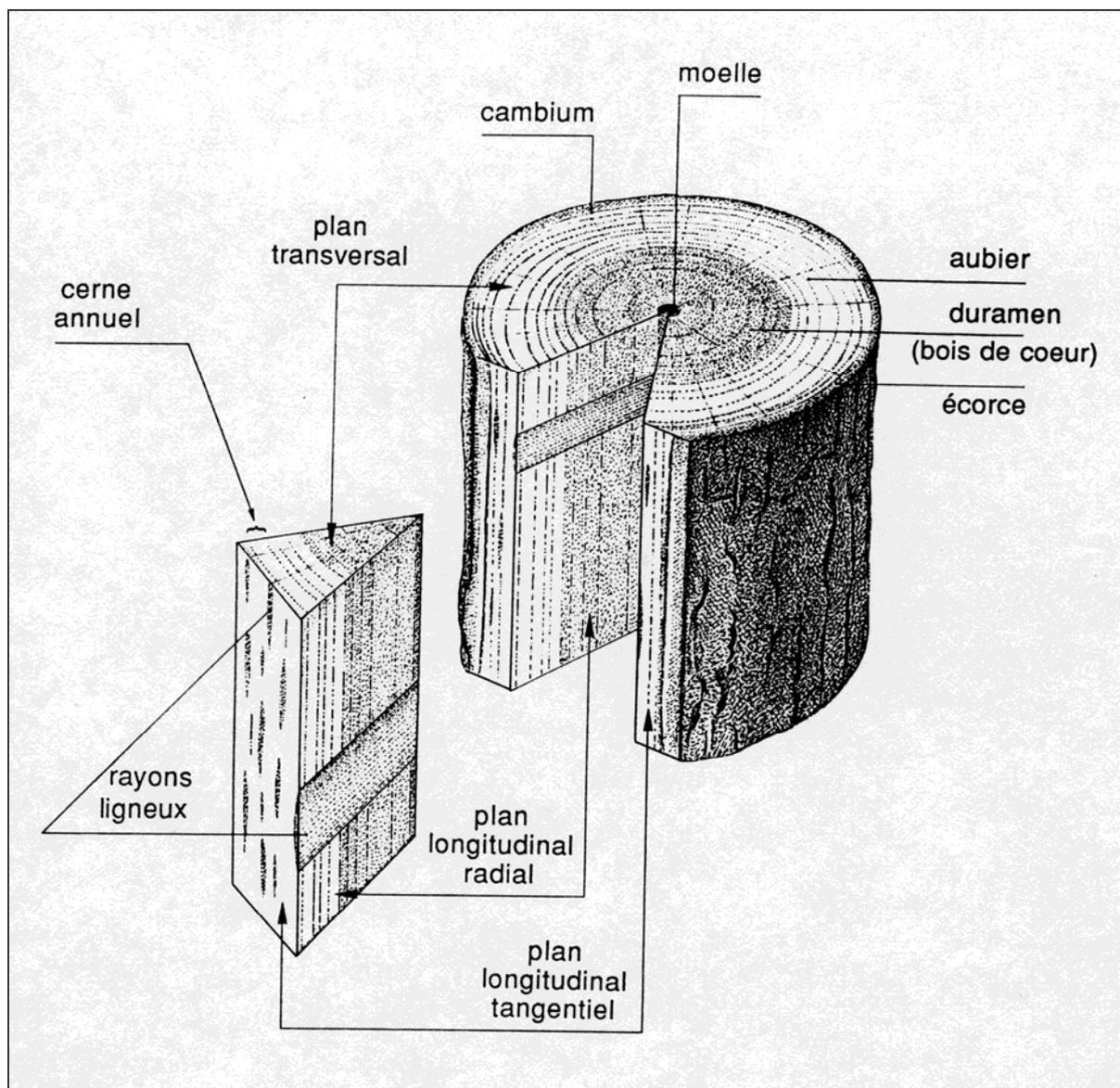
Les identifications se font par référence aux descriptions anatomiques des atlas des bois (Greguss, 1955 ; 1959 ; Jacquot, 1955 ; Jacquot et *al.*, 1973 ; Schweingruber, 1990). Cependant, ces ouvrages ne décrivent généralement qu'un nombre limité de taxons, surtout arborescents et localisés essentiellement au Nord de la Méditerranée. Seul Couvert (1977) a

réalisé un atlas concernant l'Afrique du Nord et décrit les charbons de bois d'une trentaine d'échantillons de 17 espèces.

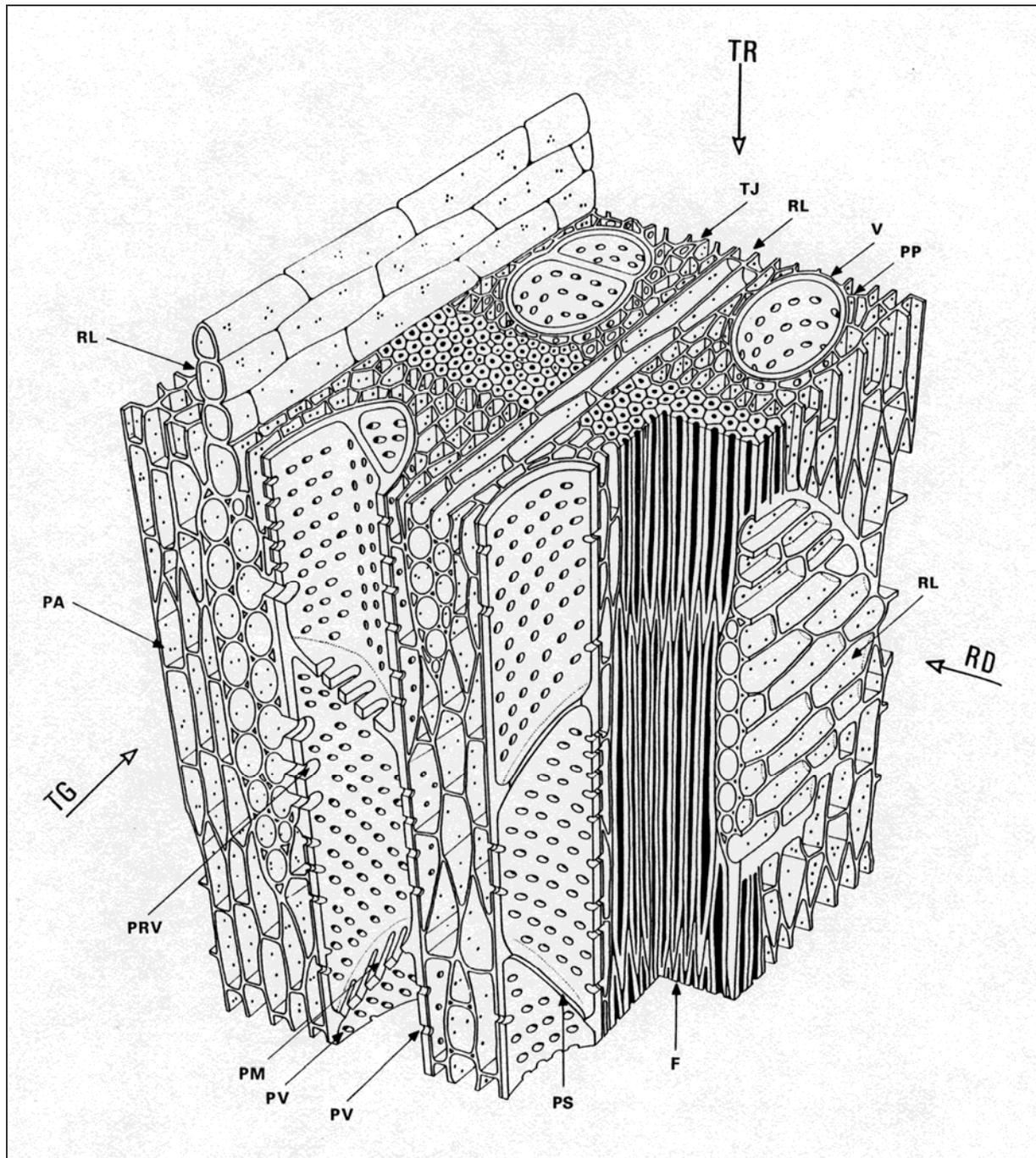
Les identifications réalisées dans le cadre de la présente étude ont fait appel à la collection de référence (anthracothèque) pour l'Afrique du Nord, constituée à Marseille par Thinon en utilisant son système de détermination adapté aux bois carbonisés (Thinon, 1992 ; 1994 a, b, c).

### - Datations

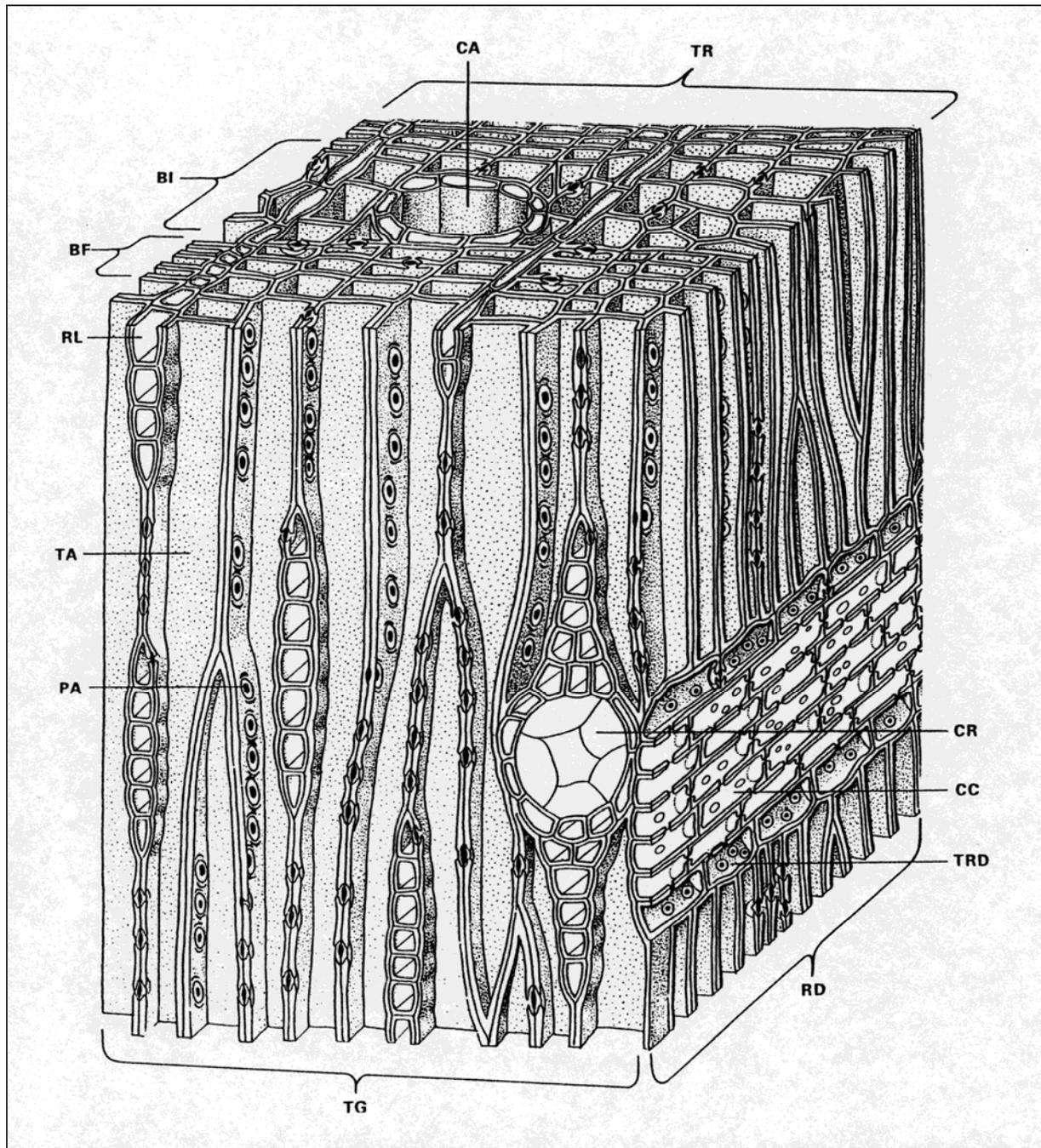
Dans le cadre de ce travail, il n'a pas été possible d'obtenir les crédits nécessaires pour les datations (par spectrométrie de masse) qui sont réalisées par des laboratoires spécialisés.



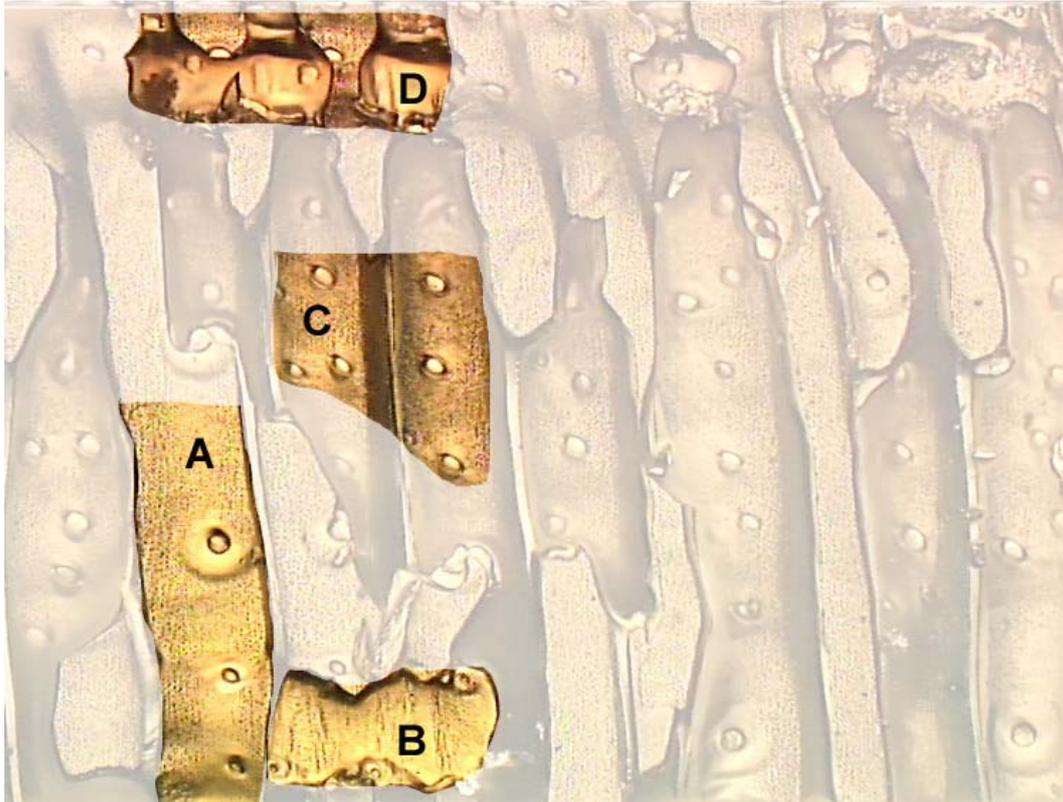
**Figure 2.6:** Trois plans de coupes dans le bois d'après Thinon (1994 a).



**Figure 2.7:** Représentation schématique tridimensionnelle des principaux éléments anatomiques d'un bois de dicotylédones (d'après Couvert, 1970, modifié par Thinin, 1994).  
 F: fibres ; PA: file cellulaire de parenchyme axial ; PM: perforation multiple ; PP: parenchyme paratrachéal ; PRV: ponctuation radio-vasculaire ; PS: perforation simple ; PV: ponctuation vasculaire ; RD: plan radial ; RL: rayon ligneux ; TG: plan tangentiel ; TJ: trachéides juxtavasculaires ; TR: plan transversal ; V: vaisseau.



**Figure 2.8:** Représentation schématique tridimensionnelle des principaux éléments anatomiques d'un bois de conifères (d'après Fuller et Tippto, modifié par Thinin, 1994).  
BF: bois final, BI: bois initial ; CA: canal résinifère axial ; CC: champs de croisement ; CR: canal résinifère radial ; PA: ponctuation aréolée ; RD: plan radial ; RL: rayon ligneux ; TA: trachéide axiale ; TG: plan tangentiel ; TR: plan transversal ; TRD: trachéide radiale.



**Figure 2.9:** Charbon de cèdre vu en plan radial montrant les éléments diagnostiques d'un champ de croisement. Reconstitution tridimensionnelle à partir de 27 images successives (profondeur de 26  $\mu\text{m}$ ) en microscopie épiscopique et lumière polarisée (objectif X50, ouverture numérique 0,85).

A: Paroi de trachéide axiale avec ponctuations aréolées de type abiétinéen. La plus grosse est en relation avec une autre trachéide axiale sous-jacente, les deux petites avec une trachéide radiale. B: Trachéide radiale avec petites ponctuations aréolées abiétinéennes. C: Parois de trachéides axiales avec ponctuations semi-aréolées de type taxodioïde en relation avec des cellules de parenchyme radial sous-jacent. D: Cellule de parenchyme radial partiellement crevée.

### - Analyse et présentation des résultats

Les résultats des identifications sont essentiellement qualitatifs et il est encore prématuré, en l'état actuel des connaissances, de vouloir établir une relation entre la biomasse des taxons incendiés et la masse résiduelle actuelle de leur charbon contenu dans le sol (anthracomasse).

Les études réalisées dans ce sens montrent que seules les valeurs relatives extrêmes ont une réelle signification (écarts au moins égaux à 50 %). Les interprétations se font donc surtout en fonction de la présence d'un taxon et des caractéristiques écologiques qui en découlent, méthode simple et fiable.

Cependant, quelques expressions quantitatives peuvent permettre des comparaisons entre niveaux d'un même sol et entre des sols différents. La masse totale des charbons supérieurs à une taille donnée (généralement 400  $\mu\text{m}$ ), extraits d'un échantillon, constitue l'anthracomasse. La richesse en charbons d'un échantillon peut être caractérisée par son "anthracomasse spécifique" (AS), c'est-à-dire la masse (exprimée en mg) des charbons contenue dans un kilogramme de sol, dont les éléments sont inférieurs à 5 mm. On peut distinguer plusieurs types d'anthracomasses spécifiques selon qu'elles se rapportent à un seul niveau, à l'ensemble des niveaux étudiés dans un profil (anthracomasse spécifique moyenne, ASM), à un taxon ou aux charbons indéterminables ou bien indéterminés (anthracomasse spécifique partielle, ASP) etc...

On doit remarquer que l'étude des distributions granulométriques des charbons, réalisée pour des sols des régions tempérées ou bien tropicales, montre que l'essentiel de l'anthracomasse se situe au-dessus de 400  $\mu\text{m}$ . Dans le cadre de notre travail, nous présentons les variations des anthracomasses spécifiques des six profils, en fonction de la profondeur, ainsi que leurs anthracomasses spécifiques moyennes.

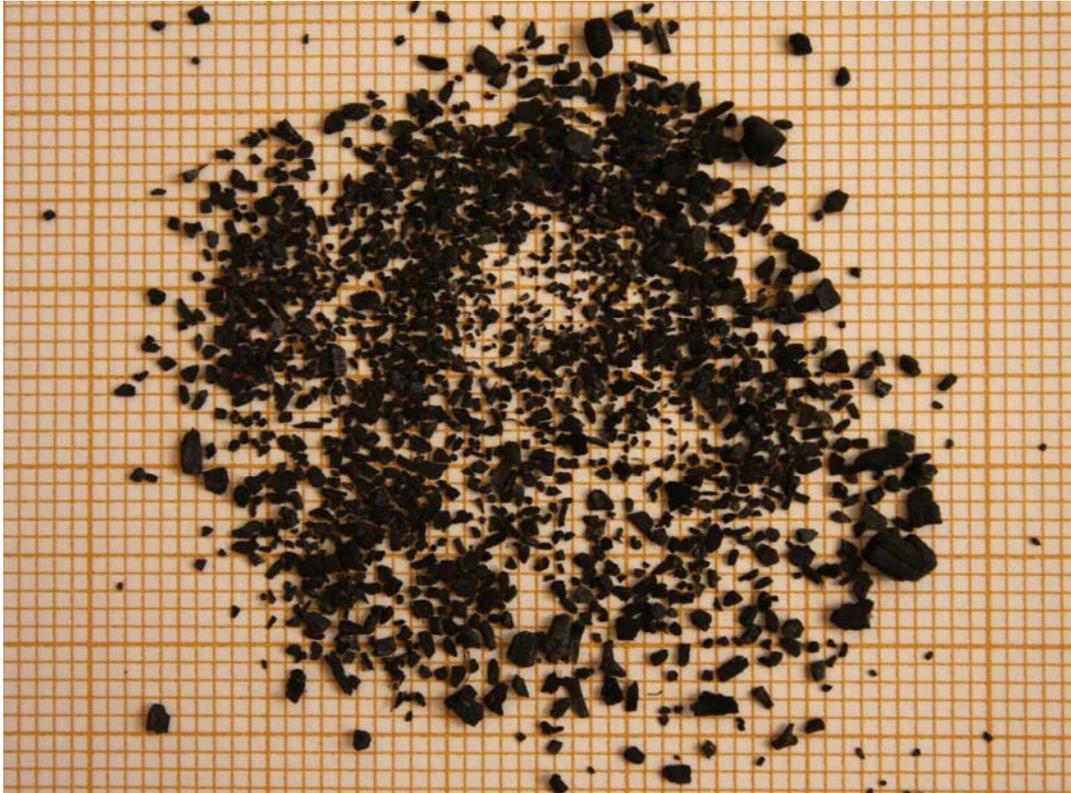
#### **2.4. Résultats**

Le processus méthodologique de la pédoanthracologie est long et minutieux. Les phases préliminaires à l'identification microscopique, notamment celles de l'extraction, des tris sous instrument optique ainsi que les nettoyages mécaniques et chimiques, représentent entre les trois quarts et les quatre cinquièmes du temps global de l'étude hors intervention de terrain. De ce fait, dans le cadre de notre thèse, les deux stages que nous avons réalisés dans le laboratoire de Thion ne nous ont permis qu'une première approche de l'étude de l'anatomie des bois. Les identifications que nous présentons ont été réalisées par ce chercheur créateur de la discipline.

Plusieurs dizaines de milliers de charbons ont été extraits des différents sols (Fig. 2.10). Cette grande quantité exclut une observation microscopique exhaustive et contraint à un échantillonnage. D'une façon générale, un premier examen des charbons au microscope stéréoscopique (à un grossissement de 5 à 15 fois) permet de distinguer les charbons des gymnospermes de ceux des angiospermes et de les séparer.

Dans le groupe des gymnospermes, on pourra aussi reconnaître, à un grossissement plus élevé (environ 20 à 30 fois), les charbons présentant des rayons ligneux de très faible hauteur de ceux qui comportent davantage de cellules. On pourra aussi distinguer les charbons à trachéides de diamètre réduit ou bien possédant des canaux résinifères. Pour les

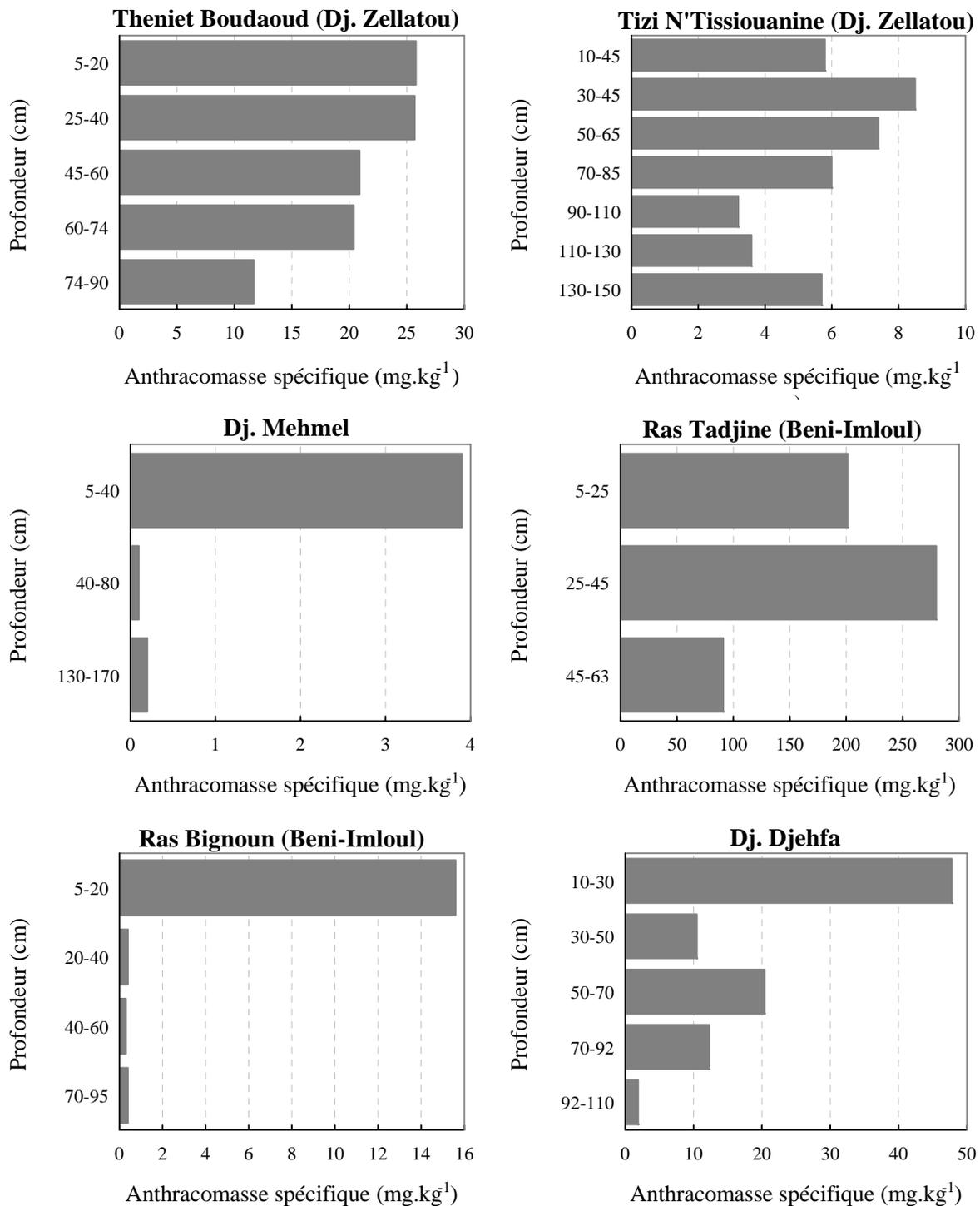
angiospermes, on peut séparer les charbons à vaisseaux de diamètres ou répartition nettement différents ou bien à rayons ligneux très développés. Après avoir constitué des lots de charbons à caractères apparemment homogènes, on peut soit réaliser un échantillonnage plus ou moins large, soit plus rarement, une étude exhaustive au microscope à fort grossissement (500 à 1000 fois).



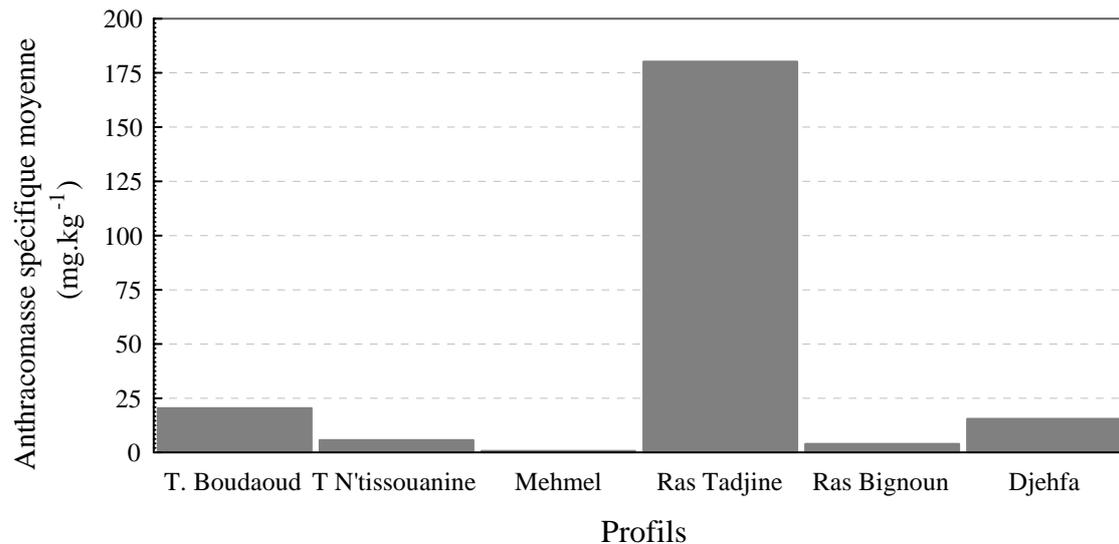
**Figure 2.10:** Fragments de charbons (sur papier millimétré) extraits du niveau V du profil Aurès 1 (Dj. Zellatou).

L'objectif de l'étude étant la recherche de charbons de cèdre, l'effort a surtout porté sur les charbons des conifères. Les taxons identifiés dans les divers niveaux des différents sols sont présentés sous forme de listes et classés par ordre quantitatif. Comme cela a été déjà précisé, l'abondance des charbons d'une espèce ne traduit pas pour autant une représentation identique dans le milieu d'origine. Une nette dominance peut cependant être significative. Les informations d'ordre écologique, apportées par la présence des espèces, sont par contre significatives. Il faut aussi remarquer qu'il peut aussi y avoir des mélanges chronologiques, liés aux perturbations des sols, notamment dans les cas de fortes déclivités et aussi celles déterminées par l'activité biologique. Les anthracomasses spécifiques des niveaux étudiés dans les 6 profils sont présentées dans la figure 2.11, la richesse générale en charbons des

divers sols, représentée par l'anthracomasse spécifique moyenne, est exprimée dans la figure 2.12.



**Figure 2.11:** Anthracomasse spécifique par horizon des différents types de sol échantillonnés.



**Figure 2.12:** Anthracomasse spécifique moyenne des différents types de sol échantillonnés.

### A. Région de Tkout, Dj. Zellatou

#### Aurès 1

Crête à l'Ouest du Theniet Boudaoud, substrat: calcaire à passées marneuses ; végétation constituée par une pelouse avec quelques individus de *Juniperus thurifera* à proximité, sur les affleurements rocheux (Fig. 2.13)

Niveau I ; 5-20 cm

*Juniperus thurifera*

*Juniperus oxycedrus*

*Quercus ilex*

*Cedrus atlantica*

Niveau II ; 25-40 cm

*Juniperus thurifera*

*Juniperus oxycedrus*

*Quercus ilex*

*Cedrus atlantica*

Niveau III ; 45-60 cm

*Juniperus thurifera*

*Juniperus oxycedrus*

*Quercus ilex*

*Cedrus atlantica**Fraxinus xanthoxyloides*

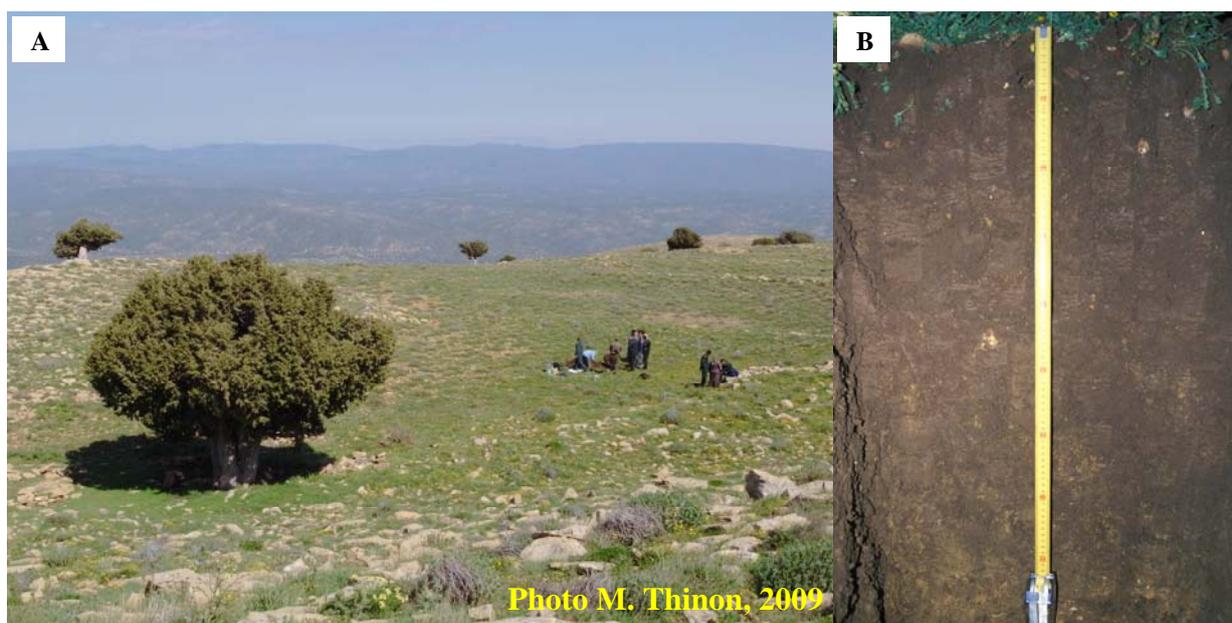
Niveau IV ; 60-74 cm

*Juniperus thurifera**Quercus ilex**Juniperus oxycedrus**Fraxinus xanthoxyloides**Cedrus atlantica*

Niveau V ; 74-90 cm

*Juniperus thurifera**Juniperus oxycedrus**Quercus ilex**Cedrus atlantica**Fraxinus xanthoxyloides*

Ce sol, à pente nulle a été creusé jusqu'à la dalle calcaire sous-jacente. Ces caractères peuvent expliquer la faible décroissance de sa richesse en charbons en fonction de la profondeur. Le cèdre est présent dans tous les niveaux et les charbons du genévrier thurifère, colonisant encore les abords du site, sont dominants. On peut également noter l'abondance des charbons du genévrier oxycèdre et du chêne vert, absents du site. Un jeune individu de frêne dimorphe a été observé non loin de la station.



**Figure 2.13:** Aurès 1, Theniet Boudaoud (Dj. Zellatou). A: contexte général, B: profil.

**Aurès 2**

Tizi-N'Tssiouanine, substrat: calcaire marneux ; milieu asylvatique, pelouse à *Hertia cheirifolia* (Fig. 2.14).

Niveau I ; 10-25 cm

*Juniperus thurifera*

*Juniperus oxycedrus*

*Fraxinus xanthoxyloides*

*Quercus ilex*

Niveau II ; 30-45 cm

*Juniperus thurifera*

*Juniperus oxycedrus*

*Quercus ilex*

*Fraxinus xanthoxyloides*

*Cedrus atlantica*

Niveau III ; 50-65 cm

*Juniperus thurifera*

*Juniperus oxycedrus*

*Quercus ilex*

*Fraxinus xanthoxyloides*



**Figure 2.14:** Aurès 2, Tizi-N'Tssiouanine (Dj. Zellatou). A: contexte général, B: profil.

Niveau IV ; 70-85 cm

*Juniperus thurifera*

*Juniperus oxycedrus*

*Quercus ilex*

Niveau V ; 90-110 cm

*Juniperus thurifera*

*Juniperus oxycedrus*

*Quercus ilex*

Niveau VI ; 110-130 cm

*Quercus ilex*

*Juniperus thurifera*

*Juniperus oxycedrus*

***Cedrus atlantica***

Niveau VII ; 130-150 cm

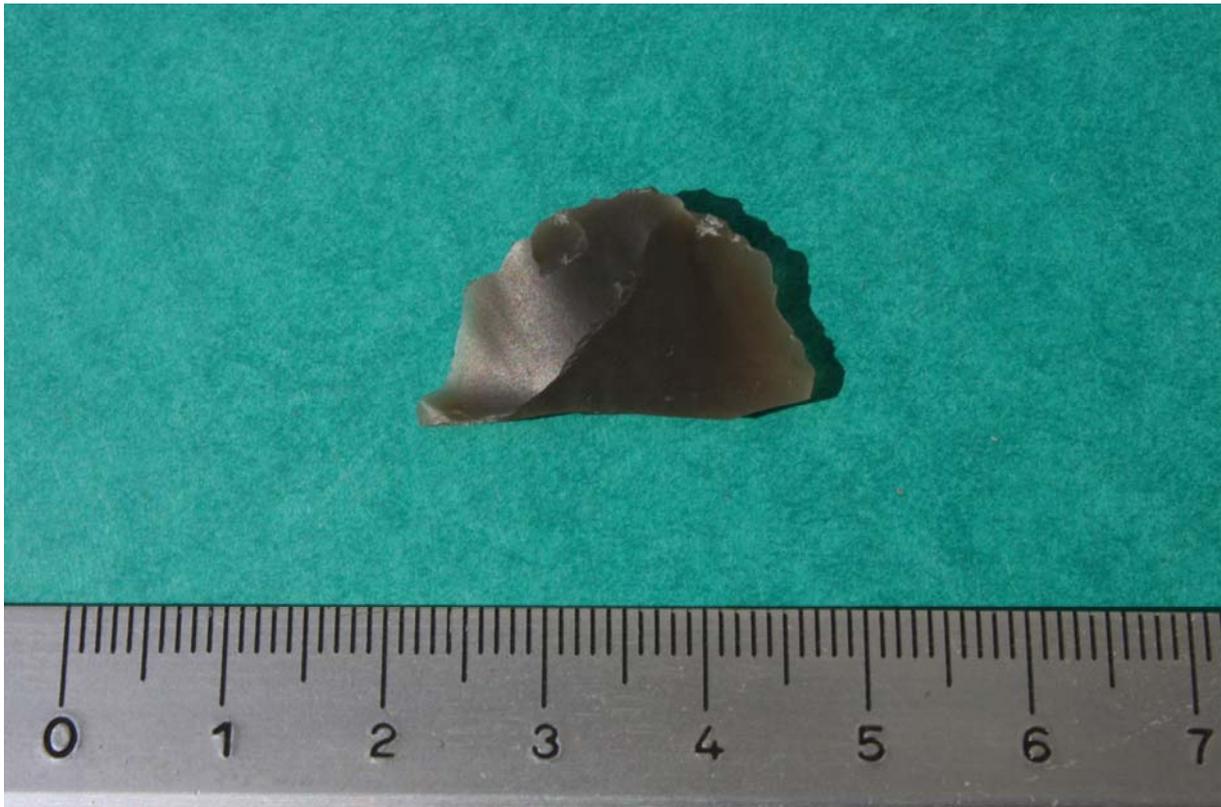
*Quercus ilex*

*Juniperus thurifera*

***Cedrus atlantica***

*Juniperus* sp.

Ce sol homogène, situé à environ 8 km au Sud du précédent, sur la même crête, n'a pas été sondé jusqu'à la roche mère en raison de son importante épaisseur. Bien que moins riche en charbons, son anthracomasse spécifique varie peu dans le profil. A noter qu'un outil préhistorique en silex (racloir, vraisemblablement néolithique) a été extrait du niveau III (Fig. 2.15). Le cèdre a également occupé le territoire par le passé, l'enregistrement de sa présence n'est cependant pas constant dans l'épaisseur du profil. Les genévriers thurifère et oxycèdre sont omniprésents tandis que le chêne vert paraît dominant en profondeur. La composition floristique ligneuse est sensiblement identique à celle identifiée dans le sol précédent.



**Figure 2.15:** Outil préhistorique en silex extrait du niveau III du profil Aurès 2 (Dj. Zellatou).

### **B. Aurès 3 (Dj. Mehmel)**

Versant Sud du Djebel Mehmel, substrat: calcaire ; milieu asylvatique (Fig. 2.16).

Niveau I ; 5-40 cm

*Juniperus oxycedrus*

Petites angiospermes indéterminables

Niveau II ; 40-80 cm

Angiosperme indéterminable

Niveau III ; 130-170 cm

*Juniperus oxycedrus*

*Juniperus thurifera*

*Quercus ilex*



**Figure 2.16:** Aurès 3 (Dj. Mehmel).

Coupe de sol réalisée à la faveur de travaux d'élargissement d'une piste. Ces travaux n'ont pas permis d'atteindre la région sommitale du massif. La pente très forte explique la faible teneur en charbons de ce profil dont l'anthracomasse spécifique moyenne ( $0.7 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) est la plus faible parmi les 7 sondages réalisés dans cette étude. Le genévrier oxycèdre est dominant tandis que le thurifère se manifeste en profondeur, accompagné par le chêne vert. Ce sondage, réalisé dans des conditions inappropriées, ne paraît pas significatif.

### **C. Pinède des Beni-Imloul**

#### **Aurès 4 (Ras-Tadjine)**

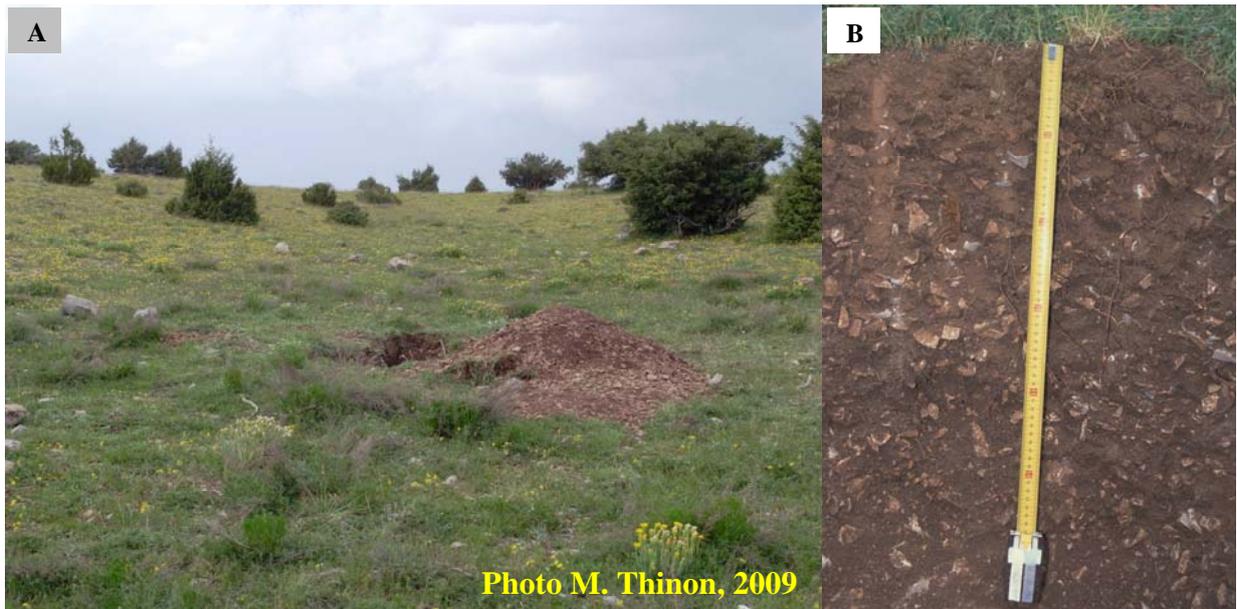
Sondage réalisé à environ 300 m à l'Ouest du sommet du Ras-Tadjine, substrat: calcaire ; végétation: pelouse colonisée par de jeunes individus de *Juniperus phoenicea*, *Juniperus oxycedrus*, *Quercus ilex* et *Fraxinus xanthoxyloides* (Fig. 2.17).

Niveau I ; 5-25 cm

*Juniperus phoenicea*

*Juniperus oxycedrus*

*Quercus ilex*



**Figure 2.17:** Aurès 4, Ras-Tadjine (pinède des Beni-Imloul). A: contexte général, B: profil.

Niveau II ; 25-45 cm

*Juniperus phoenicea*

*Juniperus oxycedrus*

*Quercus ilex*

Niveau III ; 45-63 cm

*Juniperus oxycedrus*

*Quercus ilex*

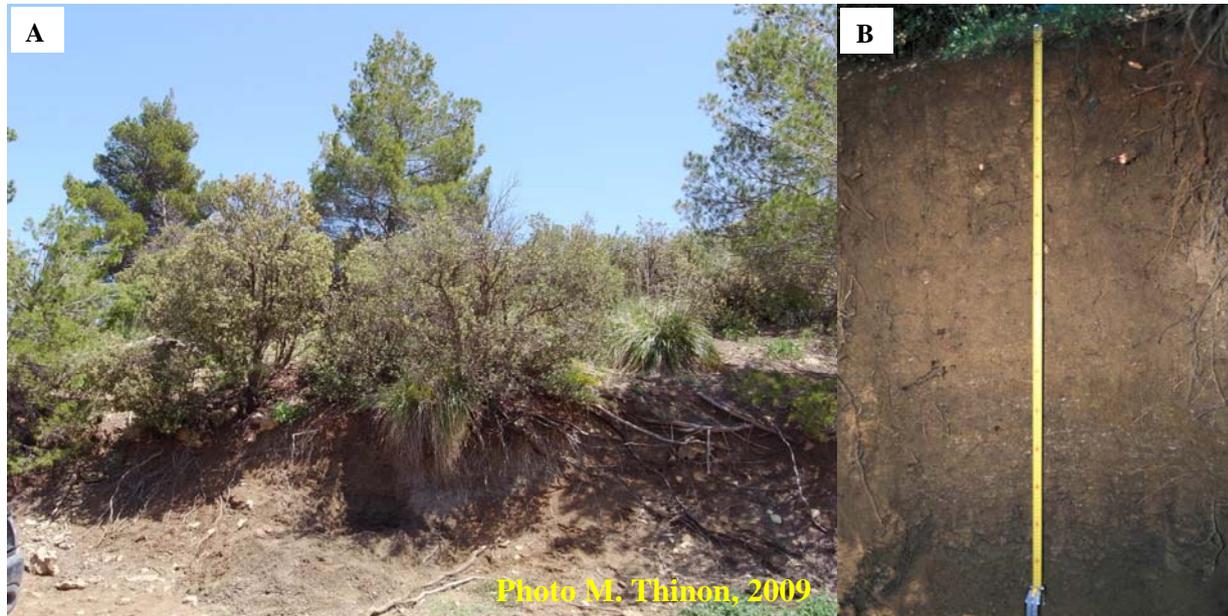
*Juniperus phoenicea*

*Fraxinus xanthoxyloides*

Ce sol, développé sur colluvium caillouteux sur dalle calcaire est très riche en charbons de bois, son anthracomasse spécifique moyenne atteint  $180.2 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Les espèces identifiées existent aujourd'hui sur le site, le genévrier rouge étant actuellement dominant sur les lithosols du sommet voisin. Le caractère peu évolué du sol, la grande richesse en charbons, souvent de taille plus importante que dans les autres sols, indiquent un âge relativement récent. La nudité pédologique du sommet, occupé par de vieux genévriers enracinés dans les diaclases, indique une intense dégradation très ancienne. Dans ces conditions, la recherche du cèdre, s'il était présent, ne peut se faire que sur d'éventuels lambeaux de sols partiellement préservés de l'érosion qu'il faudra trouver.

**Aurès 5 (Ras-Bignoun)**

Sondage situé à environ 1 km au Sud du sommet du Ras-Bignoun ; substrat: calcaire avec bancs marneux ; végétation: groupement préforestier à *Pinus halepensis*, *Quercus ilex* et *Ampelodesmos mauritanicus* (Fig. 2.18).



**Figure 2.18:** Aurès 5, Ras-Bignoun (pinède des Beni-Imloul). A: contexte général, B: Profil.

Niveau I ; 2-20 cm

*Pinus halepensis*  
*Juniperus oxycedrus*  
*Quercus ilex*  
***Cedrus atlantica***

Niveau II ; 20-40 cm

*Pinus halepensis*  
*Juniperus oxycedrus*  
*Quercus ilex*  
***Cedrus atlantica***

Niveau III ; 40-60 cm

*Pinus halepensis*  
*Quercus ilex*  
Petite angiosperme indéterminable

Niveau IV ; 70-95 cm

*Pinus halepensis*

Niveau V ; 100-120 cm

Stérile en charbons de bois

Cette coupe, réalisée en bordure de piste, a vraisemblablement été tronquée par l'érosion. En dehors du niveau supérieur, ce profil est pauvre en charbons. Le pin d'Alep, essence dominante de la forêt des Beni-Imloul est présent dans tous les niveaux. Le cèdre apparaît dans les deux niveaux supérieurs, ce qui confirme la toponymie du sommet voisin. Les autres espèces identifiées sont aujourd'hui présentes à proximité. Il n'a pas été possible de sonder le sommet et son voisinage immédiat du fait de remaniements du sol par des travaux ainsi qu'en raison de traces d'une forte érosion.

#### **D. Djebel Djehfa**

##### **Aurès 6**

Sondage situé à mi-pente, sous la crête du Djebel Djehfa ; substrat: calcaire à bancs marneux ; végétation: fruticée claire à *Quercus ilex* et *Juniperus oxycedrus* (Fig. 2.19).

Niveau I ; 10-30 cm

*Quercus ilex*

*Juniperus oxycedrus*

*Olea europaea*

Niveau II ; 30-50 cm

*Quercus ilex*

*Juniperus oxycedrus*

*Juniperus phoenicea*

*Juniperus* sp.

Niveau III ; 50-70 cm

*Quercus ilex*

*Juniperus oxycedrus*

Petite angiosperme non déterminée

Niveau IV ; 70-92 cm

*Quercus ilex*

*Juniperus oxycedrus*

*Juniperus phoenicea*

*Olea europaea*

*Fraxinus xanthoxyloides*

Niveau V ; 92-110 cm

*Quercus ilex*

*Juniperus oxycedrus*

*Quercus* sp. caducifolié

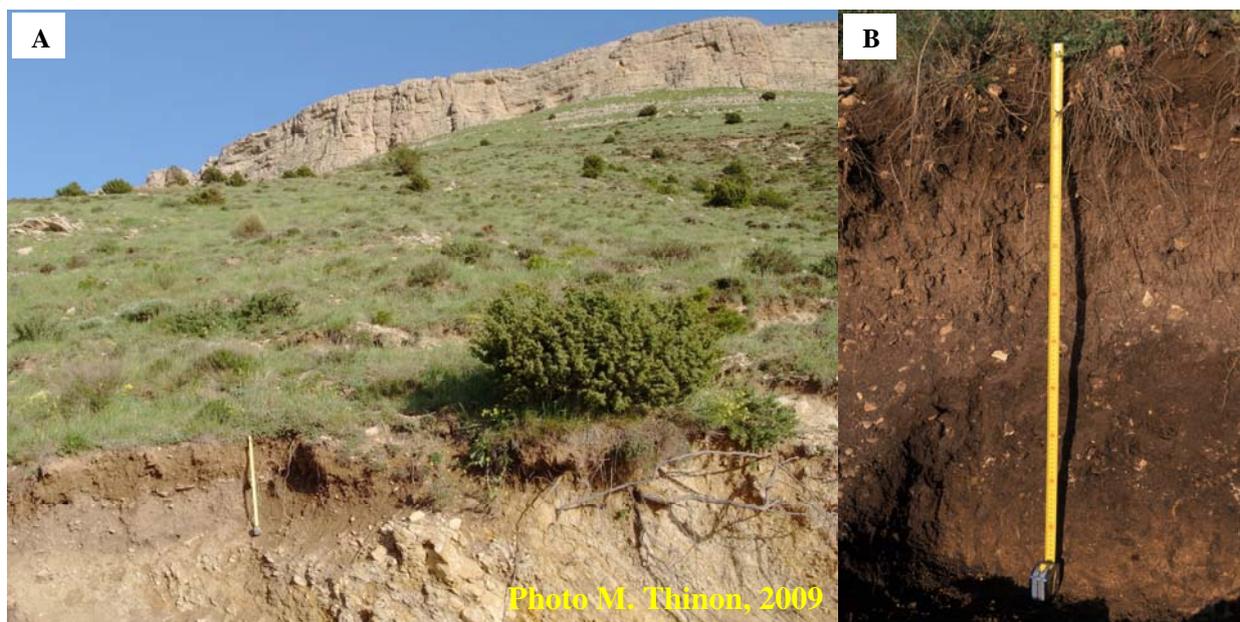
### Aurès 6 bis (Djehfa)

Prélèvement unique dans une couche de terre montrant des traces de rubéfaction par le feu (Fig. 2.19) à environ 600 m au Sud du précédent, dans des conditions de milieu sensiblement identiques.

Niveau 40-70 cm

*Juniperus oxycedrus*

*Juniperus phoenicea*



**Figure 2.19:** Aurès 6, 6 bis (Dj. Djehfa). A: contexte général, Aurès 6 bis. B: Profil Aurès 6.

Le profil 6 et le prélèvement 6 bis ont été réalisés par rafraîchissement du talus en bordure de piste sur un versant pentu. Des impératifs d'horaire n'ont pas permis de rechercher une station peu déclive au voisinage de la crête. Les identifications indiquent une présence permanente du chêne vert et du genévrier oxycèdre, espèces encore largement représentées dans le secteur. On peut remarquer, dans le niveau de profondeur, la présence d'un charbon attribuable à un chêne caducifolié, vraisemblablement *Quercus faginea*, espèce aujourd'hui très rare dans l'Aurès. A noter également les occurrences épisodiques de l'oléastre et du frêne dimorphe.

Le niveau rubéfié 6 bis est effectivement très riche en charbons, avec une anthracomasse spécifique de 385.8 mg.kg<sup>-1</sup>. La taille générale des charbons, relativement élevée, et la présence des seuls genévriers paraît indiquer qu'il s'agit d'un foyer localisé dans l'espace et le temps. Là encore, le profil 6 ne paraît pas décisif pour juger définitivement de l'absence du cèdre.

## 2.5. Discussion et conclusion

Les différents niveaux des six sols échantillonnés contiennent tous de charbons de bois, à l'exception du niveau de profondeur de la station 5 (Ras-Bignoun). De nombreux niveaux sont exceptionnellement riches, par rapport à ce qui est observé ailleurs, en Europe ou en Afrique du Nord. La recherche de la présence ancienne du cèdre sur les marges méridionales du massif de l'Aurès s'avère positive pour la moitié des stations prospectées. On doit remarquer que pour les stations où cette recherche a été négative, les sols ne présentaient pas les caractéristiques favorables à un bon enregistrement du signal phytohistorique, à savoir un sol bien développé sur une pente faible à nulle, peu affecté par l'érosion. La pente s'avère être encore une fois un facteur primordial, ainsi le sol 3, où ce facteur est maximal, présente le plus faible taux de charbons.

En l'absence de datations, on peut supposer que les incendies récurrents remontent au début de la période néolithique où apparaissent l'agriculture et surtout l'élevage, indissociables de l'usage du feu. Un sondage pédoanthracologique réalisé en milieu totalement asylvatique dans le massif du Siroua au Maroc (Thinon et Alifriqui, 2004), récemment daté, a donné des charbons âgés d'environ 8000 ans. Ces charbons appartenant au chêne vert et au frêne dimorphe attestent d'un milieu forestier incendié qui va progressivement s'ouvrir et disparaître. Un site néolithique situé à quelques centaines de mètres peut être mis en relation avec cette modification du milieu sous l'action combinée du troupeau et du feu pastoral. L'outil en silex du niveau III du sol 2 témoigne de la présence

humaine dans l'Aurès pendant le néolithique. Les débuts de l'exploitation, signalés par les charbons des niveaux sous-jacents, sont vraisemblablement contemporains des niveaux archéologiques de la grotte Capéletti (Roubet, 1979), qui s'ouvre vers 1500 m d'altitude au Nord du massif, au Khanguet Si-Mohamed-Tahar, près du Dj. Temagoult, entre Oued Taga et Tzouket. La fouille de cette grotte a livré de l'outillage en pierre taillée et polie témoignant d'une occupation par l'homme dès les débuts du néolithique en Afrique du Nord. On y trouve également des ossements d'animaux domestiques, ovins, caprins et bovins et des bois et graines carbonisés. Des datations, réalisées sur charbons de bois montrent que l'homme pasteur a commencé à occuper l'Aurès il y a plus de 7000 ans. Une vingtaine de charbons provenant de ces couches archéologiques ont été étudiés par Couvert (Couvert, 1969). Cet auteur a identifié dans des niveaux dont l'âge n'est pas précisé, l'if et le frêne dimorphe, dominants, ainsi que le chêne vert, un peuplier et le frêne oxyphylle (*Fraxinus angustifolia*), ces deux taxons étant liés à la présence d'un oued voisin. L'usage commun du feu pour gérer les pâturages est donc très ancien en Algérie du Nord. Ces données rejoignent celles du sondage pédoanthracologique marocain, au Sud du Haut-Atlas.

A l'issue de cette étude, le cèdre apparaît être une composante ancienne des forêts du Sud de l'Aurès. Le sol 2 constitue vraisemblablement le point extrême de l'aire de l'espèce au voisinage du Sahara. Il serait intéressant de réaliser des sondages plus méridionaux sur le Djebel Taktiout et la crête de l'Ahmar Khaddou, tout en recherchant des sols favorables pour les stations 3, 4 et 6.

Cependant le chêne vert constituait sans doute l'espèce dominante des peuplements forestiers de la plupart des sites étudiés. Si des variations climatiques ont pu légèrement affecter l'aire potentielle du cèdre, on peut raisonnablement penser que le frêne dimorphe possède des exigences écologiques proches de celles du cèdre et que sa présence actuelle peut être considérée comme un indicateur positif.

Cette étude pédoanthracologique, appliquée à la recherche de l'aire du cèdre à l'échelle d'un passé séculaire à millénaire, montre l'intérêt de cette discipline à grande précision spatiale comme outil de gestion des milieux boisés ou asylvatiques. En dehors des apports à la connaissance phytoécologique, elle peut servir de base rationnelle pour le choix des essences dans les opérations de restauration des milieux forestiers.

## **Troisième chapitre**

# **Reconstitution de la sécheresse dans l'Aurès: Approche dendroclimatologique**

### 3.1. Introduction

La dendrochronologie est une science qui repose sur l'analyse des cernes annuels de croissance et sur leur datation. Elle nous permet de reconstituer le paléoclimat à partir des cernes de croissance qui constituent des archives des données climatiques.

En Algérie, les études dendrochronologiques sont très peu nombreuses (Messaoudène, 1983 ; Messaoudène et *al.*, 1997) et restent limitées à l'étude de la relation croissance-climat. Pour le cèdre de l'Atlas, les premières études ont été menées par Touchan et *al.* (2008 a ; 2011) où la première chronologie a été élaborée et appliquée pour étudier la répartition spatiotemporelle de la sécheresse durant les 9 derniers siècles.

L'objectif visé dans ce chapitre est d'élaborer une chronologie pour le cèdre dans l'Aurès et de reconstituer le climat à l'échelle séculaire. Cette reconstitution nous permettra de vérifier si les épisodes de mortalité signalés dans les cédraies coïncident avec les périodes de sécheresse identifiées dans cette étude. Il s'agit en fait d'une étude rétrospective de la sécheresse à travers la relation existante entre l'épaisseur du cerne et les paramètres climatiques, particulièrement les précipitations comme facteur limitant de la croissance dans la région.

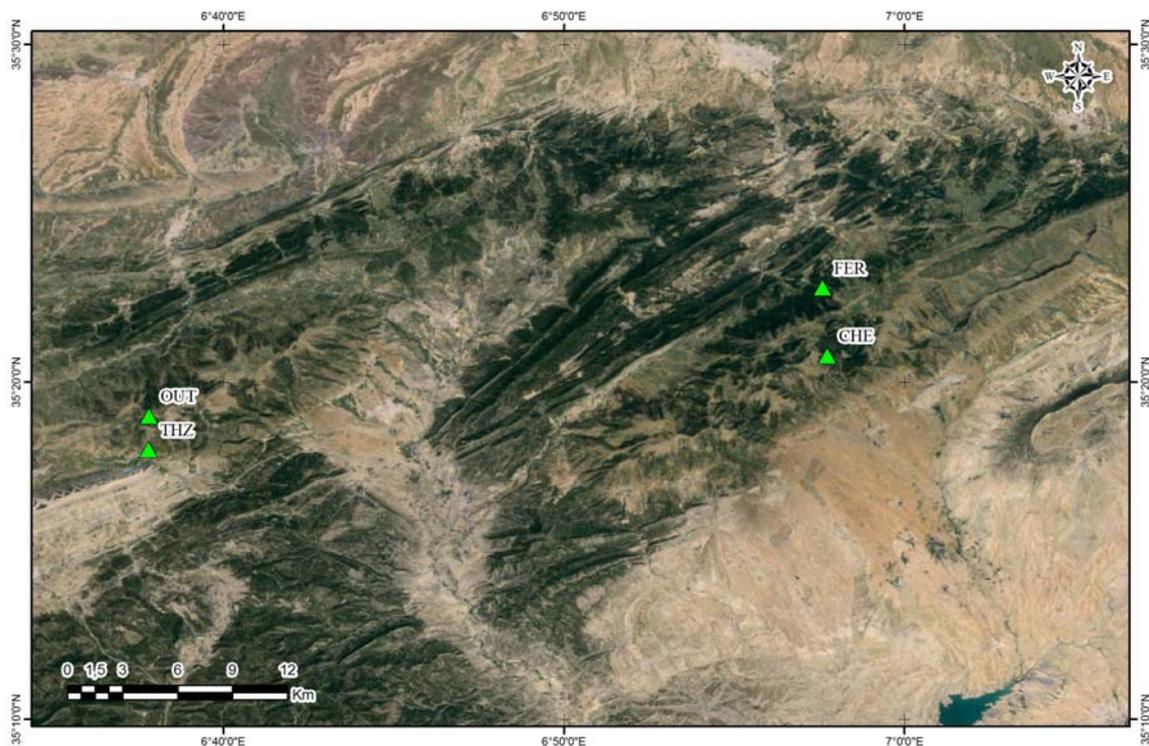
### 3.2. Matériel et méthodes

#### 3.2.1. Choix des sites

Dans la cédraie du Chelia et des Ouled-Yaâgoub, quatre peuplements purs de *Cedrus atlantica* ont été choisis pour l'élaboration d'une chronologie régionale. Afin de maximiser la sensibilité, les peuplements choisis sont localisés dans la mesure du possible dans des conditions défavorables (pente forte, sol squelettique). Le tableau 3.1 donne quelques caractéristiques écologiques ainsi que la taille d'échantillonnage pour chaque site.

**Tableau 3.1:** Caractéristiques écologiques des sites et taille d'échantillonnage.

Site	Altitude (m)	Pente (%)	Exposition	Nombre d'arbres
Oued Tidder, Chelia (OUT)	2150	60	Sud	21
Theniet Zamroune, Chelia (THZ)	1875	47	Sud	20
Chentgouma, O.Yaâgoub (CHE)	1750	42	Nord.Est	12
Feraoun, O.Yaâgoub (FER)	1510	58	NW	12



**Figure 3.1:** Localisation des sites d'échantillonnage.

### 3.2.2. Récolte des données

#### 3.2.2.1. Données relatives aux cernes

##### A. Epaisseurs des cernes

Dans les peuplements échantillonnés, 122 carottes (deux carottes par arbre le plus souvent) ont été prélevées sur 65 arbres vivants. Après avoir préparé les carottes, les séries de cernes sont inter-datées suivant les techniques dendrochronologiques standards (Stockes et Smiley, 1968). L'inter-datation est réalisée en comparant, pour chaque site, les séquences des cernes des deux carottes d'un même arbre puis celles des arbres différents. L'inter-datation étant faite, l'épaisseur de chaque cerne est mesurée avec une précision de 1/100 de mm. En plus de l'inter-datation visuelle, les séries chronologiques des différentes carottes ont été ensuite traitées à l'aide du programme COFECHA (Holmes, 1983). Ce programme effectue une vérification statistique des données, détecte des erreurs d'inter-datation ou de mesure et propose certaines possibilités de corrections.

## **B. Indice de croissance (standardisation)**

L'inter-datation étant vérifiée, les séries chronologiques en épaisseur de cerne sont transformées en séries d'indice de croissance sans unité afin d'éliminer les effets des facteurs non climatiques qui peuvent influencer la croissance radiale des arbres comme l'âge de l'arbre, sa taille et sa position sociale dans le peuplement (Cook et Briffa, 1990). Cette technique consiste à établir, pour chaque série, une courbe de croissance théorique par ajustement de fonction, ce qui implique le choix d'un modèle mathématique qui sera ajusté à la série d'épaisseurs mesurées. Ainsi, à chaque cerne correspondent deux valeurs d'épaisseur, une valeur mesurée et une valeur estimée par le modèle ajusté. Les valeurs de l'indice de croissance sont obtenues en divisant la valeur mesurée par la valeur estimée. La série ainsi obtenue par le passage de l'épaisseur du cerne (mm) à l'indice de croissance (sans unité) est appelée chronologie standard.

Les modèles mathématiques utilisés pour l'ajustement des courbes théoriques sont très nombreux. Dans cette étude nous avons choisi une fonction spline cubique, méthode de lissage la plus utilisée en dendrochronologie qui donne la meilleure standardisation (Nicault et al., 2010).

Afin de diminuer la persistance des effets non liés au climat de l'année, les séries d'indice de croissance sont soumises à un traitement qui élimine les auto-corrélations, c'est-à-dire l'effet des conditions antérieures sur la croissance de l'année en cours. La série qui résulte de cette opération est appelée chronologie résiduelle.

Cette technique de standardisation a été réalisée à l'aide du programme ARSTAN (Cook, 1985).

### **3.2.2.2. Données du climat**

Pour les précipitations, la moyenne des données de 6 stations (Batna, Yabous, Chelia, Ichmoul, Bouhmama et Ain-Mimoun) a été retenue pour une période commune de 41 ans (1970-2010). Quant aux températures, nous avons utilisé les données enregistrées à la station de Batna pour la même période.

### 3.2.3. Reconstitution du climat

#### 3.2.3.1. Fonction de réponse

L'objectif principal de la fonction de réponse est de déterminer dans quelle mesure les facteurs climatiques peuvent influencer la croissance radiale des arbres (Guiot et Nicault, 2010). Cette technique, développée par Fritts (1976), consiste à établir une régression orthogonalisée où la variable dépendante est l'indice de croissance et les variables indépendantes sont les données climatiques mensuelles afin de déterminer les mois et/ou la saison ayant un effet sur la croissance du cerne. Pour cela, plusieurs programmes ont été développés. Dans cette étude nous avons utilisé DENDROCLIM (Biondi et Waikul, 2004) et SEASCORR (Meko et *al.*, 2011). Le premier programme analyse la relation entre l'indice de croissance et les deux facteurs climatiques (précipitations et températures) séparément et mois par mois, tandis que le programme SEASCORR présente l'avantage de considérer les deux facteurs simultanément ; l'un primaire et l'autre secondaire. En plus de l'analyse mensuelle, ce programme combine les mois en construisant des saisons de plus en plus longues (2 mois à 12 mois) pour déterminer la saison la plus déterminante de la croissance du cerne. La fonction de réponse est établie à partir de la série dendrochronologique et les 24 régresseurs ; précipitations mensuelles et températures moyennes mensuelles d'octobre de l'année  $t-1$  à septembre de l'année  $t$ .

En milieu contraignant où la relation cerne-climat est significative et stable, la fonction de réponse peut être utilisée à des fins de reconstitutions climatiques (Guiot et Nicault, 2010).

#### 3.2.3.2. Fonction de transfert

La fonction de transfert est une régression linéaire établie entre l'indice de croissance comme variable indépendante et les données climatiques saisonnières identifiées par la fonction de réponse comme variable dépendante.

Avant d'élaborer le modèle de transfert final pour toute la période (1971-2010), il faut vérifier la stabilité du modèle en divisant cette période en deux sous-périodes: 1971-1990 et 1991-2010. Chaque sous-période est utilisée pour calibration (étalonnage) et pour vérification, c'est-à-dire le modèle établi (calibré) pour une sous-période doit être appliqué (vérifié) pour l'autre, en comparant les valeurs estimées et celles observées. Cette technique est largement employée dans la reconstitution du climat (Meko et Graybill, 1995 ; Touchan et *al.*, 2003 ; 2005 a, b ; 2008 a, b).

La validité du modèle est testée par le critère de précision de régression usuel, coefficient de détermination ( $R^2$ ), et le critère de stabilité du modèle, réduction d'erreur (RE). Un RE positif indique un modèle stable. En plus de ces deux critères, la procédure de PRESS (somme des carrées de prédiction) est utilisée pour tester la validité du modèle de transfert final (Touchan et *al.*, 1999 a, b ; 2003 ; 2005 a, b). Cette technique qui repose sur la prédiction des observations non incluses dans la construction du modèle, consiste à calculer autant de régressions que d'observations. A chaque fois une observation est éliminée et le modèle établi pour le reste des observations est appliqué pour prédire l'observation éliminée. La somme des carrées des écarts, entre les valeurs observées et celles prédites par le modèle, constitue un très bon critère à partir duquel on peut estimer le coefficient de détermination de prédiction, critère de validité de la fonction de transfert.

### **3.2.3.3. Identification des années de sécheresse**

Les années de sécheresse sont définies sur la base des précipitations estimées inférieures à un seuil de sécheresse fixé arbitrairement. Ce seuil doit être suffisamment sévère pour représenter une distinction significative des conditions moyennes. Les seuils de sécheresse généralement utilisés varient entre 80 % (Touchan et *al.*, 1999 ; Touchan et Hughes, 1999 ; Touchan et *al.*, 2003, Touchan et *al.*, 2005 b) et 90 % (Touchan et *al.*, 2005 a ; Hirsch et *al.*, 2007) de la moyenne des précipitations observées. Dans cette étude, nous avons adopté le seuil de 90 %.

## **3.3. Résultats**

### **3.3.1. Chronologie**

Lors de l'inter-datation nous avons enregistré 441 cernes manquants ou incomplets entre 1384 et 2010 dont 50 % ont été localisés dans le 20<sup>ème</sup> siècle. Le grand nombre de cernes manquants a été enregistré dans les sites du Chelia avec 1,15 % contre 0,43 % dans ceux des Ouled-Yaâgoub.

Avant de combiner tous les sites pour l'élaboration d'une chronologie régionale, deux chronologies ont été élaborées, l'une pour le massif du Chelia et l'autre pour celui des Ouled-Yaâgoub.

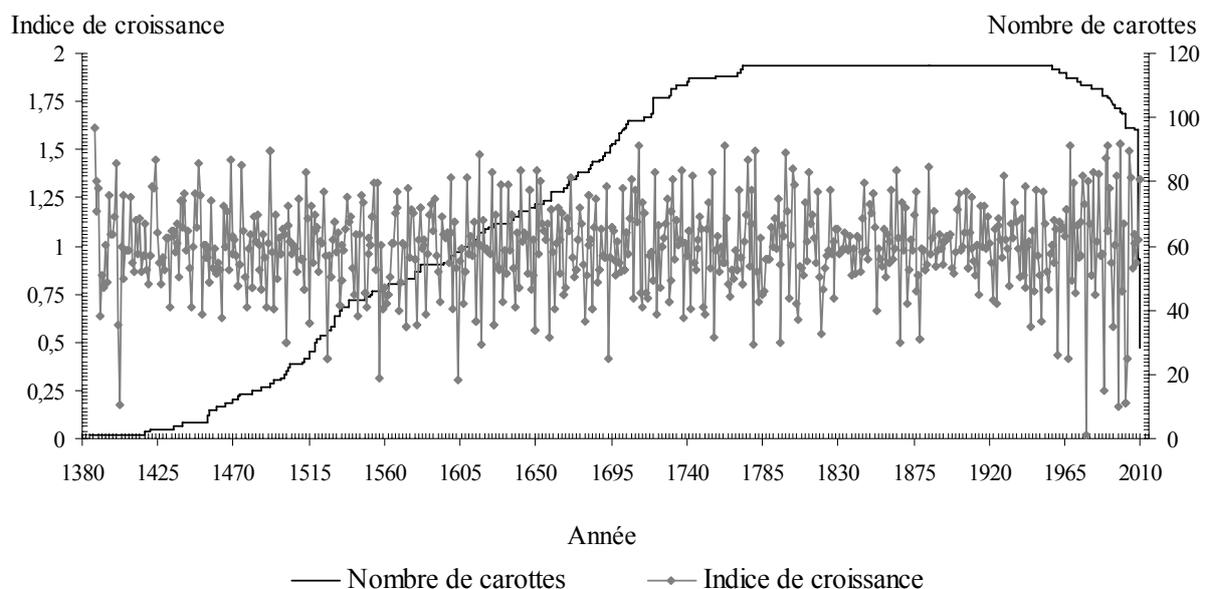
Les principaux paramètres statistiques et dendrochronologiques des différentes chronologies sont présentés dans le tableau 3.2.

La figure 3.2 illustre le nombre de carottes prélevées et l'indice de croissance de la chronologie résiduelle régionale pour la période 1387-2010.

Fixant le seuil de l'EPS (*expressed population signal*) à 0.85 (Wigley et al., 1984, Brifa et Jones, 1990 ; Mérian et al., 2013) une chronologie régionale de 556 ans (1455-2010) a été retenue pour la reconstitution climatique.

**Tableau 3.2:** Principaux paramètres statistiques et dendrochronologiques de l'indice de croissance.

Chronologie	Standard			Résiduelle		
	O.Yaâgoub	Chelia	Régionale	O.Yaâgoub	Chelia	Régionale
Moyenne	0,9742	1,0106	0,9972	0,988	0,9932	0,9928
Médiane	0,9749	0,9757	0,9976	0,9901	0,9984	0,9981
Sensibilité moyenne	0,2472	0,2573	0,2355	0,2558	0,2815	0,2572
Ecart-type	0,2549	0,331	0,2513	0,2189	0,2453	0,2233
Dissymétrie	0,1003	1,38	0,0771	-0,4298	-0,3134	-0,4104
Aplatissement	1,3501	7,1013	1,5673	0,7551	0,8573	0,9174
<b>Autocorrélation</b>						
Autocorrélation d'ordre 1	0,3394	0,5241	0,3221	-0,0039	-0,0066	-0,0075
Autocorrélation d'ordre 2	0,2412	0,2651	0,1857	-0,0033	-0,0111	-0,0187
Autocorrélation d'ordre 3	0,1363	0,0528	0,0682	-0,0583	-0,0803	-0,0978
<b>Corrélation moyenne</b>						
Entre carottes	0,371	0,392	0,342	0,518	0,552	0,524
Entre arbres	0,363	0,388	0,339	0,511	0,549	0,521
Intra-arbres	0,676	0,605	0,626	0,77	0,74	0,763
Carottes avec la moyenne	0,62	0,63	0,587	0,713	0,736	0,71



**Figure 3.2:** Chronologie résiduelle régionale et nombre de carottes.

### 3.3.1.1. Sensibilité

La sensibilité moyenne d'une série chronologique exprime l'ampleur des changements affectant à court terme l'épaisseur des cernes (Lebourgeois, 2010). Elle s'exprime comme suit:

$$S_j = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} \left| \frac{2(x_{t+1} - x_t)}{x_{t+1} + x_t} \right|$$

Où

$x_t$  = l'épaisseur du cerne formé à l'année  $t$ ,

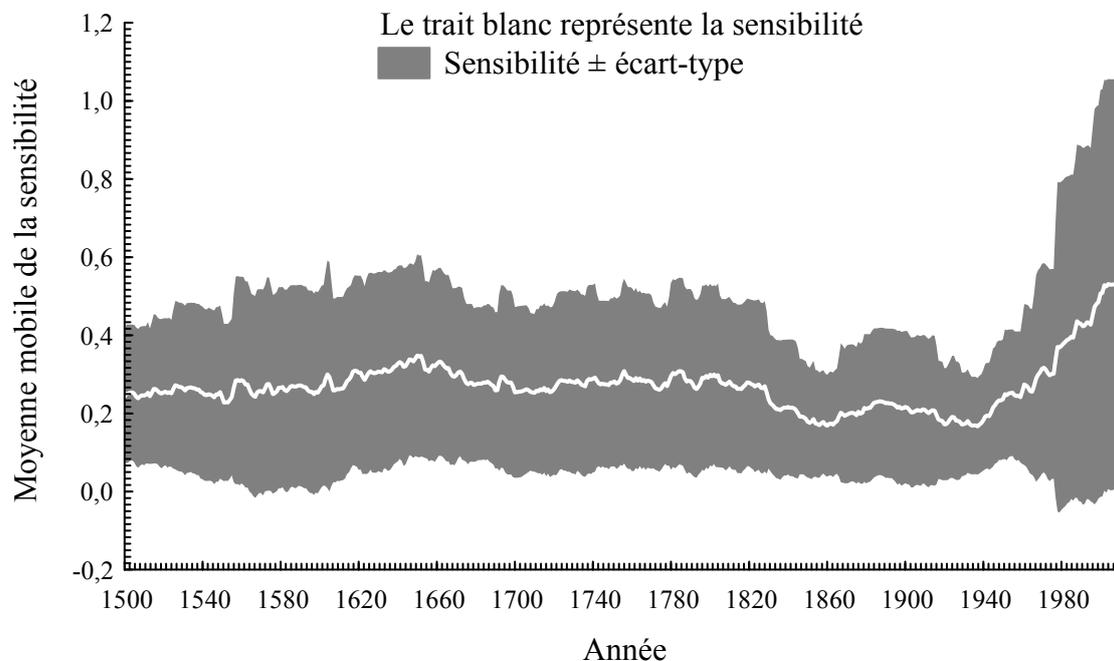
$x_{t+1}$  = l'épaisseur du cerne formé à l'année suivante  $t+1$ ,

$n$  = le nombre d'années disponible pour la série,

Ce paramètre peut varier de 0, pour deux cernes successifs égaux, à 2 lorsque l'un des deux cernes successifs est absent (épaisseur nulle).

Les fortes valeurs du coefficient de sensibilité moyenne de 0.24-0.26 (tableau 3.2) traduisent le degré d'influence du facteur climatique annuel sur la croissance du cerne.

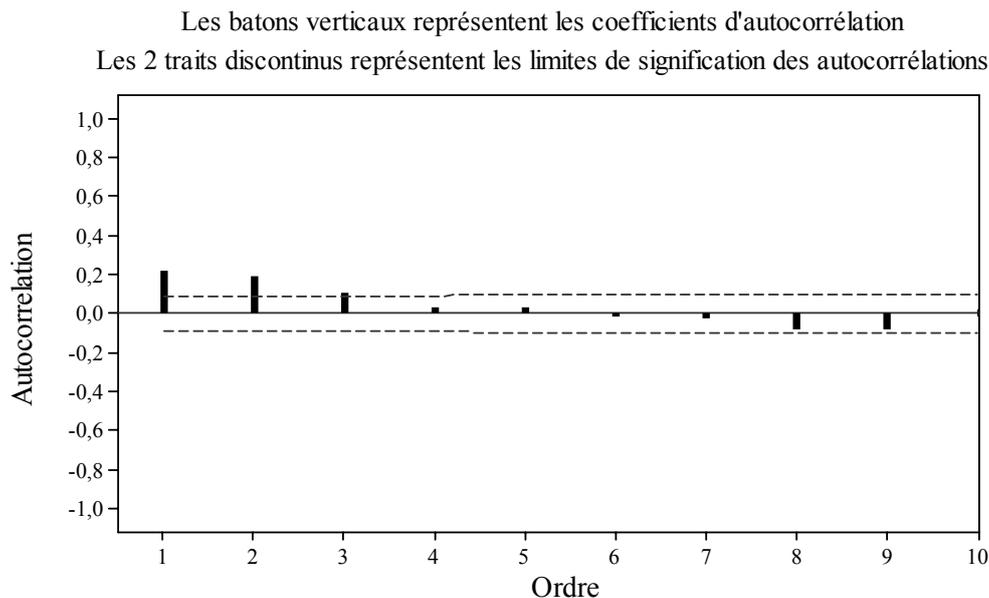
Afin d'analyser l'évolution temporelle de la sensibilité, nous avons représenté dans la figure 3.3 la moyenne mobile des sensibilités sur des périodes de 50 ans. Il en ressort que les sensibilités les plus élevées sont enregistrées durant la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle.



**Figure 3.3:** Moyenne mobile des sensibilités par période de 50 ans. La moyenne est représentée à la fin de la période.

### 3.3.1.2. Autocorrélations

Le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 qui quantifie l'interdépendance entre deux épaisseurs successives de la même série est de 0.32 (Fig. 3.4). Il exprime l'effet des conditions conduisant à l'élaboration du cerne de l'année ( $t-1$ ) sur la mise en place du cerne de l'année ( $t$ ). Le coefficient d'autocorrélation d'ordre 2 est de 0.18. L'élimination de cet effet est justifiée par les faibles valeurs des coefficients d'autocorrélation de la chronologie résiduelle (tableau 3.2).



**Figure 3.4:** Autocorrélations de la chronologie standard au seuil de signification 0.05.

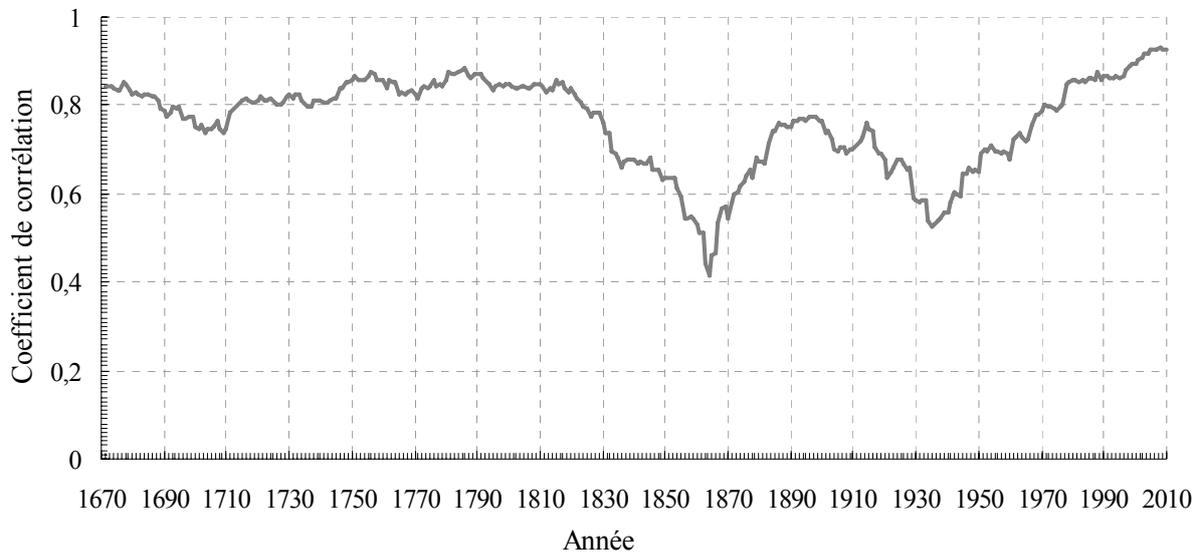
### 3.3.1.3. Corrélations

Les séries d'indice de croissance montrent une bonne similarité entre les arbres avec une corrélation de 0.52, traduisant ainsi une bonne synchronisation des fluctuations annuelles des individus du peuplement.

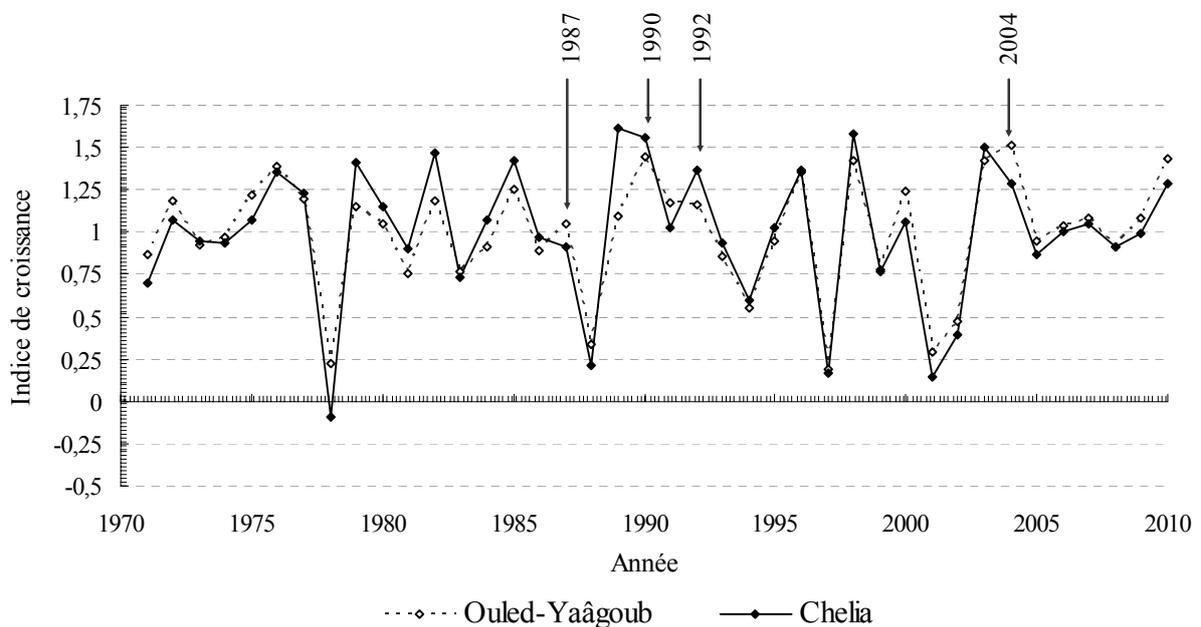
### 3.3.1.4. Synchronisme des deux chronologies, Chelia et Ouled-Yaâgoub

Les deux chronologies montrent une bonne similarité entre elles avec un coefficient de corrélation de 0.81. Cependant, l'examen du coefficient de corrélation entre les deux chronologies sur des périodes de 50 ans, pour la période commune 1622-2010, montre deux périodes de discordance pendant le 19<sup>ème</sup> et le 20<sup>ème</sup> siècle (Fig. 3.5). L'examen de la figure 3.6, qui représente l'évolution de l'indice de croissance des deux chronologies pour la période

de calcul de la fonction de réponse et la fonction de transfert, montre un bon synchronisme à l'exception des années: 1987, 1990, 1992 et 2004.



**Figure 3.5:** Moyenne mobile des coefficients de corrélation par période de 50 ans.



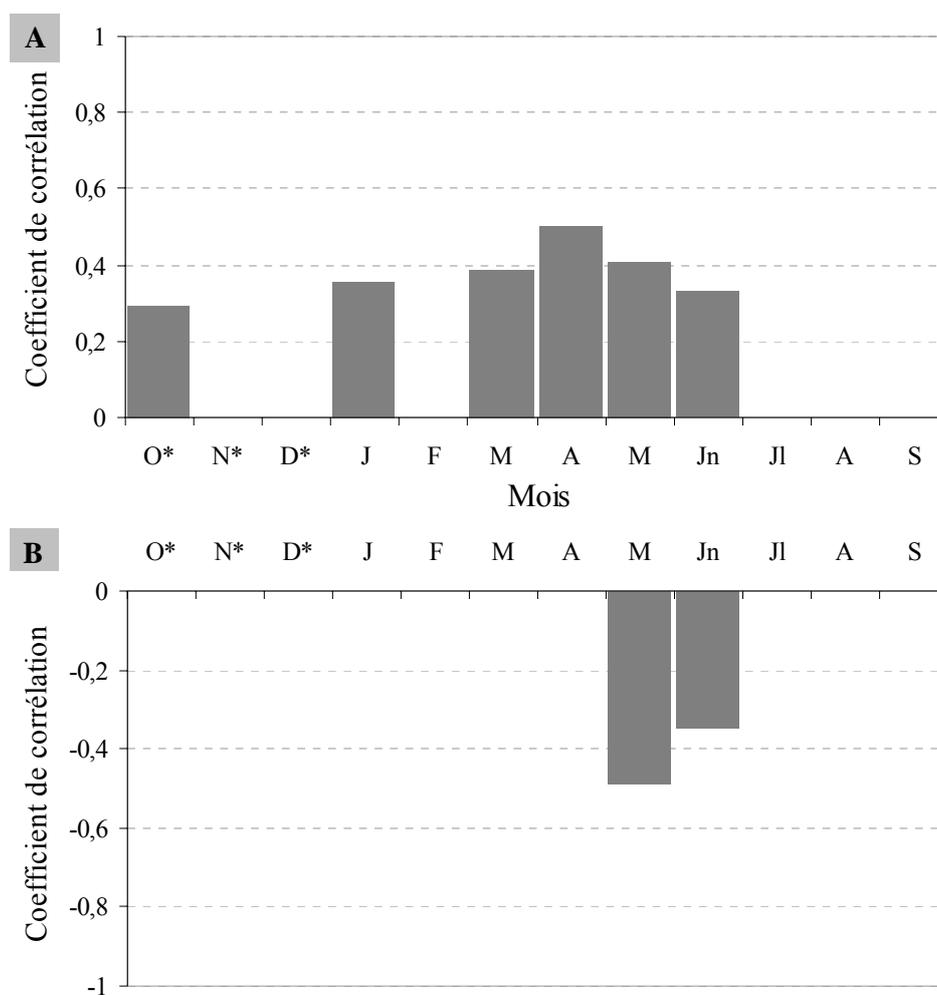
**Figure 3.6:** Evolution de l'indice de croissance des deux chronologies pour la période 1971-2010.

### 3.3.2. Reconstitution des précipitations

#### 3.3.2.1. Fonction de réponse

##### A. Résultats de DENDROCLIM

Les résultats de l'analyse à l'aide du programme DENDROCLIM sont illustrés dans la figure 3.7 où seulement les corrélations significatives sont représentées. Les résultats de cette analyse montrent que les précipitations abondantes ont une influence positive sur la croissance du cerne. Cette relation n'est pas limitée aux mois de la saison de croissance (mars-septembre), mais les précipitations automnales et hivernales (octobre, janvier) précédant la saison de croissance ont aussi un effet. Quant aux températures, celles des mois de mai et juin ont une action négative sur la croissance du cerne. Les hautes températures de cette période sèche induisent une réduction de la croissance en diamètre.

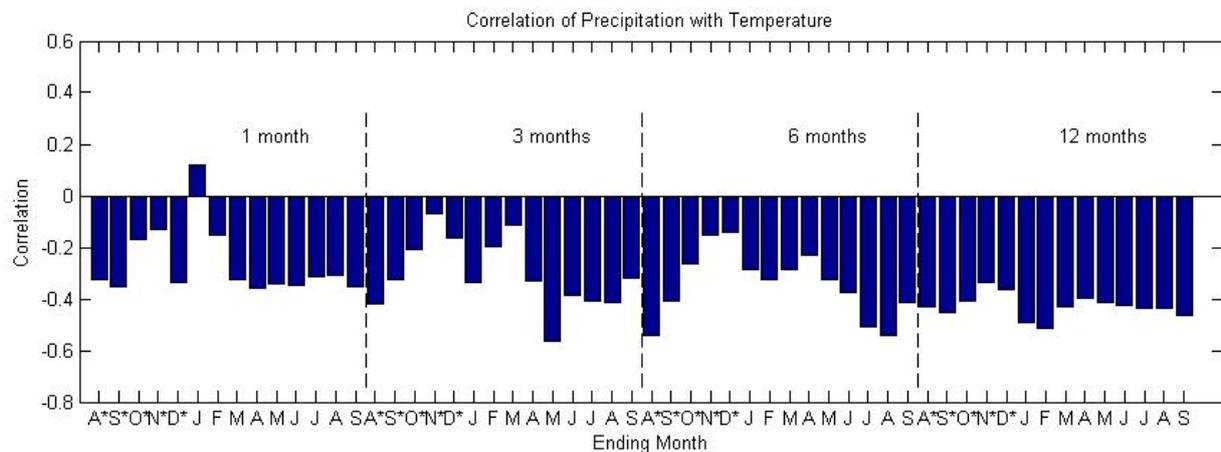


**Figure 3.7:** Résultats de la fonction de réponse à l'aide du programme DENDROCLIM.  
A: précipitations, B: températures

## B. Résultats de SEASCORR

Les résultats des analyses des corrélations saisonnières à l'aide du programme SEASCORR, en considérant les précipitations comme facteur primaire, sont présentés dans le tableau 3.3, tandis que ceux prenant les températures comme facteur primaire sont présentés dans le tableau 3.4.

Les notions de facteur climatique primaire et secondaire sont introduites dans ce programme en raison des corrélations éventuelles entre ces deux facteurs. Pour le facteur primaire on retient sa corrélation totale avec l'indice de croissance, quant au facteur secondaire, si une corrélation entre ce facteur et le facteur primaire existe, elle doit être éliminée d'où la notion de corrélation partielle. La figure 3.8 montre, qu'à l'exception du mois de janvier, les hautes températures sont associées à des précipitations faibles.



**Figure 3.8:** Corrélations entre les précipitations et les températures mensuelles.

Il ressort du tableau 3.3 que les résultats de la fonction de réponse à l'aide du programme SEASCORR confirment ceux obtenus par DENDROCLIM. L'effet positif des précipitations comme facteur primaire sur la croissance en diamètre n'est pas limité à celles de la saison de croissance mais aussi à celles d'automne et d'hiver.

Pour les températures, qu'elles soient considérées comme facteur primaire (tableau 3.4) ou secondaire (Fig. 3.9), les corrélations les plus élevées sont enregistrées pour les mois de mai et juin. Les hautes températures de ces deux mois ont un effet négatif significatif sur la croissance du cerne. Cependant, la corrélation partielle de la température moyenne des mois de mai à août coïncidant avec la saison de croissance, semble être significative aussi (Fig. 3.9).

Nous remarquons aussi que le signal thermique est moins important que celui des précipitations, ce qui valide le choix de la température comme facteur secondaire et les précipitations comme facteur primaire dans cette analyse (Fig. 3.9).

La fonction de réponse semble être stable dans le temps et dans l'espace, et plus robuste pour les peuplements des Ouled-Yaâgoub que ceux du Chelia (tableaux 3.3 et 3.4).

A des fins de reconstitution climatique, les précipitations cumulées d'octobre de l'année précédente à juin de l'année en cours ont été retenues comme fonction de réponse.

**Tableau 3.3:** Corrélations saisonnières entre l'indice de croissance et les précipitations comme facteur primaire.

Nombre de mois	Mois	Période			Taille de l'échantillon	Test $\Delta Z$	P
		Totale	Initiale	Finale			
<b>Chronologie Chelia</b>							
1	Avr	0.51	0.49	0.52	20-19	-0.0451	0.897
2	Mar-Avr	0.55	0.46	0.63	20-19	-0.2478	0.477
3	Mar-Mai	0.60	0.56	0.65	20-19	-0.1451	0.677
4	Mar-Jun	0.65	0.59	0.73	20-19	-0.2492	0.474
5	Fév-Jun	0.69	0.60	0.76	20-19	-0.3118	0.371
6	Fév-Jul	0.68	0.62	0.74	20-19	-0.2151	0.537
7	Dec*-Jun	0.70	0.66	0.75	20-19	-0.1764	0.612
8	Dec*-Jul	0.70	0.68	0.74	20-19	-0.1189	0.733
9	Oct*-Jun	0.72	0.62	0.81	20-19	-0.4076	0.242
10	Sep*-Jun	0.73	0.62	0.84	20-19	-0.4958	0.155
11	Août*-Jun	0.74	0.64	0.85	20-19	-0.4936	0.156
12	Août*-Jul	0.74	0.65	0.84	20-19	-0.4561	0.190
<b>Chronologie Ouled-Yaâgoub</b>							
1	Avr	0.51	0.52	0.52	20-19	0.0030	0.993
2	Avr-Mai	0.61	0.66	0.59	20-19	0.1192	0.732
3	Mar-Mai	0.67	0.70	0.70	20-19	-0.0379	0.913
4	Mar-Jun	0.72	0.67	0.74	20-19	-0.2298	0.509
5	Fév-Jun	0.75	0.71	0.81	20-19	-0.2117	0.543
6	Fév-Jul	0.76	0.75	0.78	20-19	-0.0486	0.889
7	Dec*-Jun	0.76	0.73	0.84	20-19	-0.1432	0.681
8	Oct*-Mai	0.79	0.76	0.87	20-19	-0.1005	0.773
9	Oct*-Jun	0.81	0.75	0.89	20-19	-0.2405	0.490
10	Août*-Mar	0.83	0.78	0.88	20-19	-0.2732	0.433
11	Août*-Jun	0.84	0.78	0.90	20-19	-0.3787	0.277
12	Août*-Jul	0.85	0.80	0.89	20-19	-0.2900	0.405
<b>Chronologie régionale</b>							
1	Avr	0.52	0.51	0.53	20-19	-0.0299	0.932
2	Mar-Avr	0.57	0.50	0.63	20-19	-0.1897	0.586
3	Mar-Mai	0.63	0.60	0.66	20-19	-0.0967	0.781
4	Mar-Jun	0.68	0.62	0.75	20-19	-0.2423	0.487
5	Fév-Jun	0.71	0.64	0.78	20-19	-0.2868	0.410
6	Fév-Jul	0.71	0.67	0.75	20-19	-0.1730	0.620
7	Dec*-Jun	0.73	0.69	0.77	20-19	-0.1667	0.632
8	Oct*-Mai	0.73	0.64	0.80	20-19	-0.3338	0.338
9	Oct*-Jun	0.75	0.66	0.82	20-19	-0.3718	0.286
10	Sep*-Jun	0.77	0.66	0.86	20-19	-0.4873	0.162
11	Août*-Jun	0.78	0.68	0.87	20-19	-0.4820	0.166
12	Août*-Jul	0.78	0.70	0.86	20-19	-0.4332	0.214

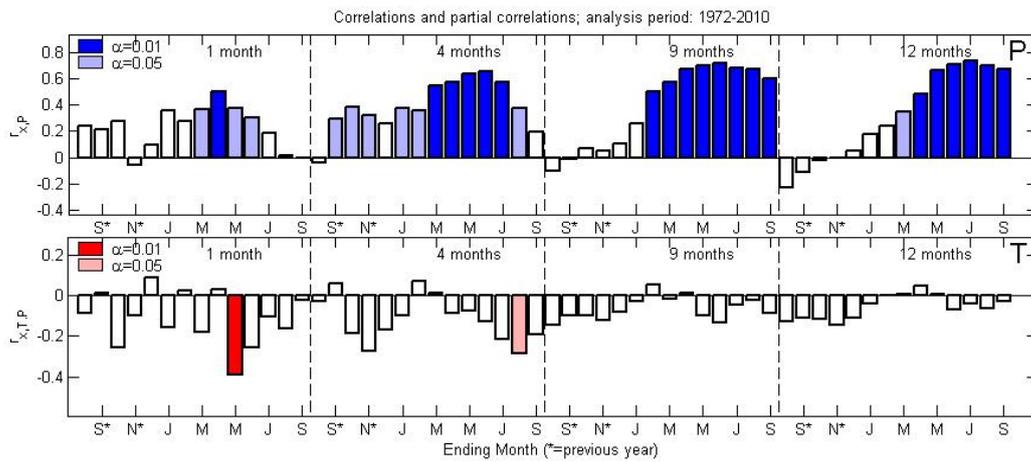
**Tableau 3.4:** Corrélations saisonnières entre l'indice de croissance et les températures comme facteur primaire.

Nombre de mois	Mois	Période			Taille de l'échantillon	Test DZ	P
		Totale	Initiale	Finale			
<b>Chronologie Chelia</b>							
1	Mai	-0.47	-0.34	-0.61	20-19	0.3513	0.313
2	Mai-Jun	-0.48	-0.31	-0.64	20-19	0.4330	0.214
3	Avr-Jun	-0.42	-0.36	-0.49	20-19	0.1521	0.662
4	Mar-Jun	-0.45	-0.39	-0.55	20-19	0.2065	0.553
5	Mar-Jul	-0.41	-0.37	-0.51	20-19	0.1668	0.632
6	Mar-Aug	-0.40	-0.37	-0.48	20-19	0.1271	0.715
7	Mar-Sep	-0.37	-0.36	-0.46	20-19	0.1252	0.719
8	Oct*-Mai	-0.36	-0.48	-0.34	20-19	-0.1598	0.646
9	Oct*-Jun	-0.38	-0.45	-0.44	20-19	-0.0117	0.973
10	Sep*-Jun	-0.38	-0.46	-0.46	20-19	-0.0036	0.992
11	Août*-Jun	-0.38	-0.44	-0.47	20-19	0.0281	0.936
12	Août*-Jul	-0.37	-0.43	-0.44	20-19	0.0102	0.977
<b>Chronologie Ouled-Yaâgoub</b>							
1	Mai	-0.56	-0.52	-0.62	20-19	0.1505	0.666
2	Mai-Jun	-0.57	-0.46	-0.65	20-19	0.2710	0.437
3	Mai-Jul	-0.49	-0.44	-0.54	20-19	0.1289	0.711
4	Mar-Jun	-0.48	-0.51	-0.48	20-19	-0.0431	0.901
5	Mar-Jul	-0.44	-0.49	-0.42	20-19	-0.0881	0.800
6	Mar-Août	-0.42	-0.50	-0.38	20-19	-0.1442	0.679
7	Mar-Sep	-0.40	-0.46	-0.38	20-19	-0.1014	0.771
8	Fév-Sep	-0.38	-0.46	-0.37	20-19	-0.1025	0.769
9	Oct*-Jun	-0.41	-0.57	-0.33	20-19	-0.2951	0.397
10	Sep-Jun	-0.41	-0.57	-0.34	20-19	-0.2998	0.405
11	Août*-Jun	-0.40	-0.57	-0.33	20-19	-0.3065	0.379
12	Août*-Jul	-0.39	-0.56	-0.30	20-19	-0.3211	0.357
<b>Chronologie régionale</b>							
1	Mai	-0.50	-0.39	-0.62	20-19	0.3024	0.385
2	Mai-Jun	-0.51	-0.36	-0.65	20-19	0.3900	0.263
3	Mai-Jul	-0.45	-0.35	-0.56	20-19	0.2705	0.437
4	Mar-Jun	-0.46	-0.44	-0.53	20-19	0.1285	0.712
5	Mar-Jul	-0.42	-0.41	-0.48	20-19	0.0862	0.805
6	Mar-Août	-0.41	-0.42	-0.45	20-19	0.0417	0.905
7	Mar-Sep	-0.39	-0.40	-0.44	20-19	0.0523	0.881
8	Oct*-Mai	-0.37	-0.52	-0.30	20-19	-0.2601	0.455
9	Oct*-Jun	-0.38	-0.48	-0.40	20-19	-0.0961	0.783
10	Sep*-Jun	-0.39	-0.50	-0.42	20-19	-0.0779	0.779
11	Août*-Jun	-0.39	-0.49	-0.43	20-19	-0.0789	0.821
12	Août*-Jul	-0.38	-0.48	-0.40	20-19	-0.0961	0.783

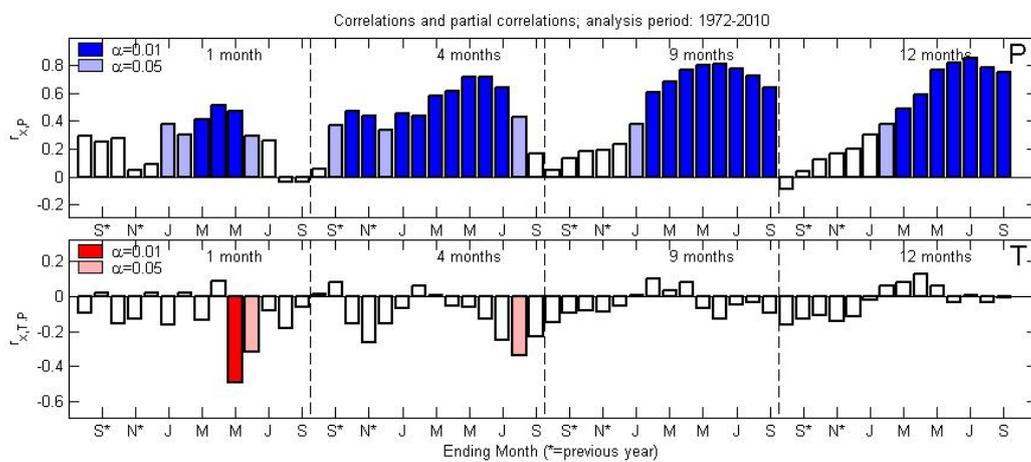
- L'astérisque indique l'année précédente.

- Le test statistique  $\Delta Z$  est la différence entre les corrélations transformées pour les périodes initiale et finale selon Panofsky et Brier (1968) ; Snedecor et Cochran (1989) in Meko et al. (2011).

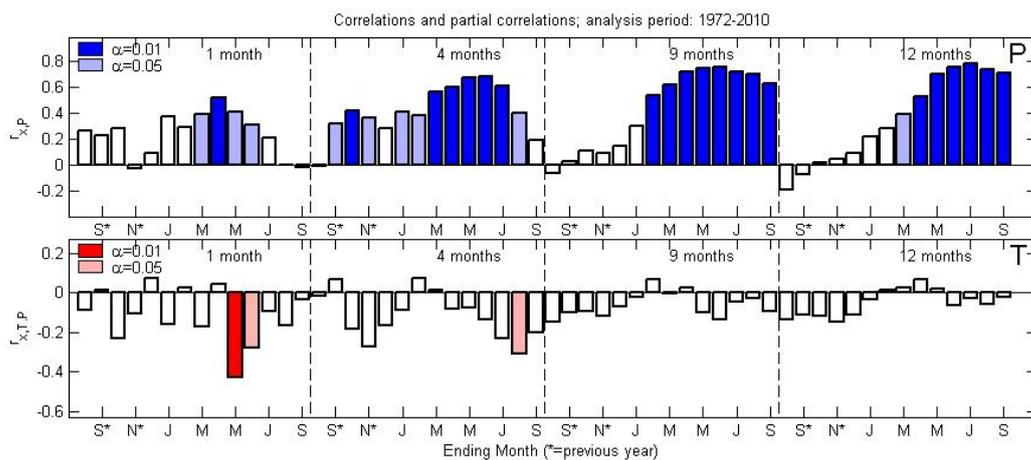
-  $P$  est la valeur de probabilité du test de l'hypothèse nulle, c'est-à-dire les corrélations des échantillons de la période initiale et finale sont les mêmes. Une différence significative entre les corrélations est indiquée par une faible valeur de  $p$  ( $p < 0.05$ ).



**Chelia**



**Ouled-Yaâgoub**

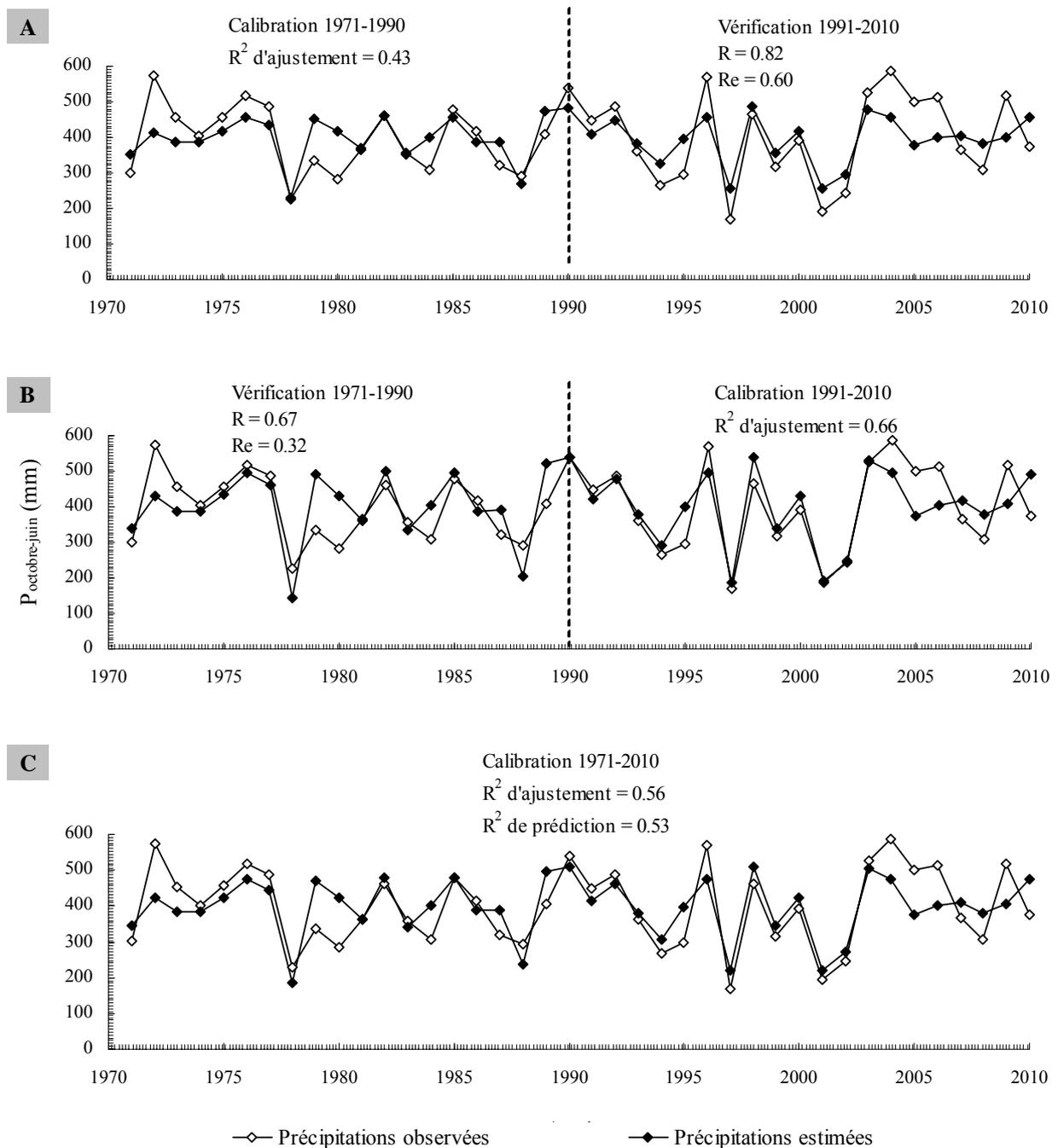


**Chelia + Ouled-Yaâgoub**

**Figure 3.9:** Corrélations saisonnières entre l'indice de croissance des trois chronologies et les facteurs climatiques (précipitations comme facteur primaire, températures comme facteur secondaire).

### 3.3.2.2. Fonction de transfert (reconstitution des précipitations)

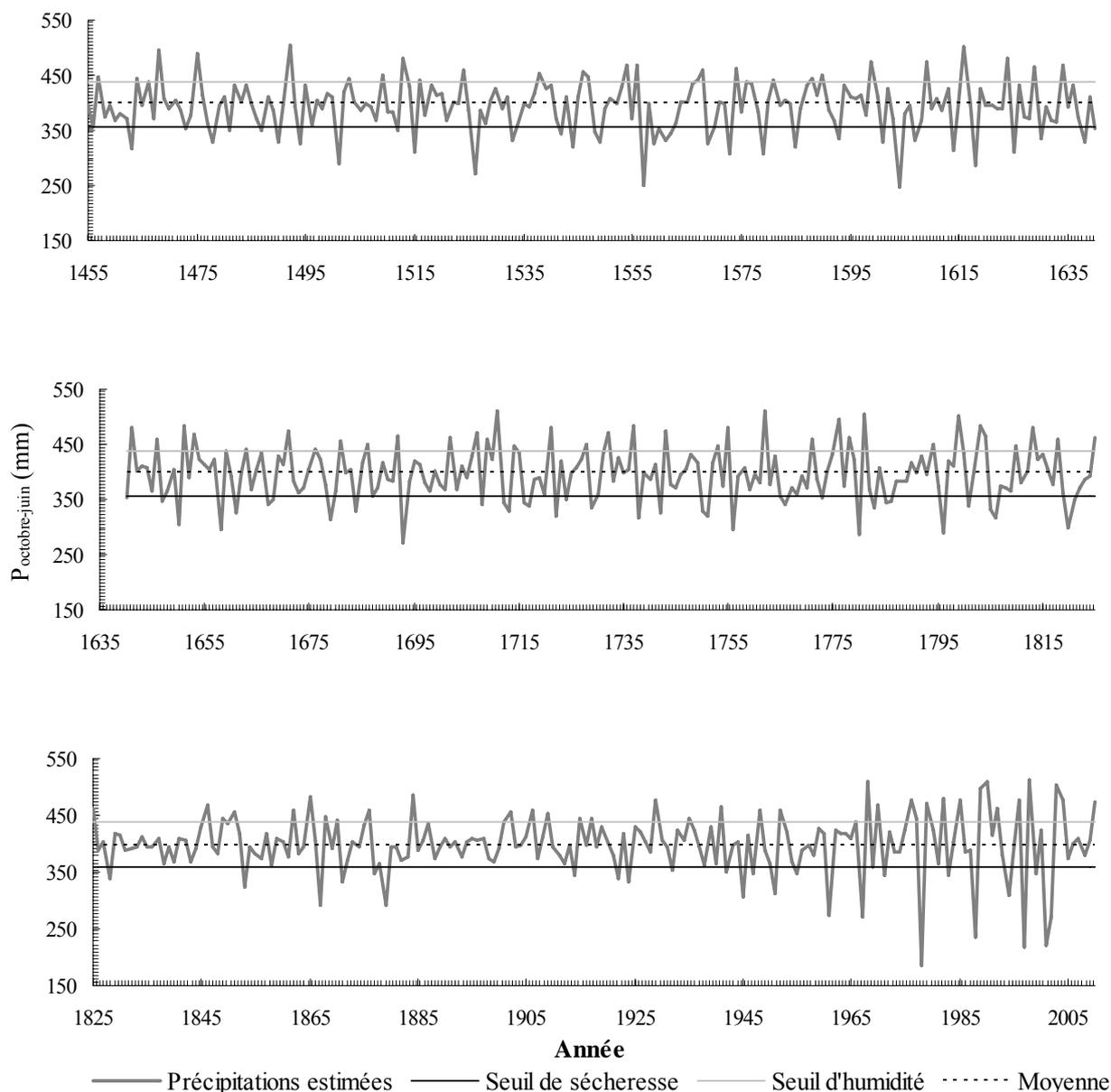
Les figures 3.10 A et 3.10 B montrent les périodes de calibration et de vérification du modèle exprimant les précipitations en fonction de l'indice de croissance avec les critères de validité du modèle. Le modèle final construit pour la période 1971-2010 (Fig. 3.10 C) est de la forme:  $P_{\text{octobre-juin}} = 181 + 216.I$  (I est l'indice de croissance). Les coefficients de corrélation (R) et de détermination ( $R^2$ ) sont calculés entre les précipitations observées et celles estimées par le modèle. Le RE (réduction d'erreur) est le critère de stabilité du modèle.



**Figure 3.10:** Précipitations observées et estimées pour la période 1971-2010.

### 3.3.2.3. Identification des années sèches

Après l'estimation des précipitations d'octobre à juin depuis 1455, le seuil de 90 % de la moyenne des précipitations observées pour la période 1971-2010, correspondant à 357.5 mm, a été utilisé pour déterminer les années de sécheresse (Fig. 3.11).



**Figure 3.11:** Précipitations estimées d'octobre à juin pour la période 1455-2010.

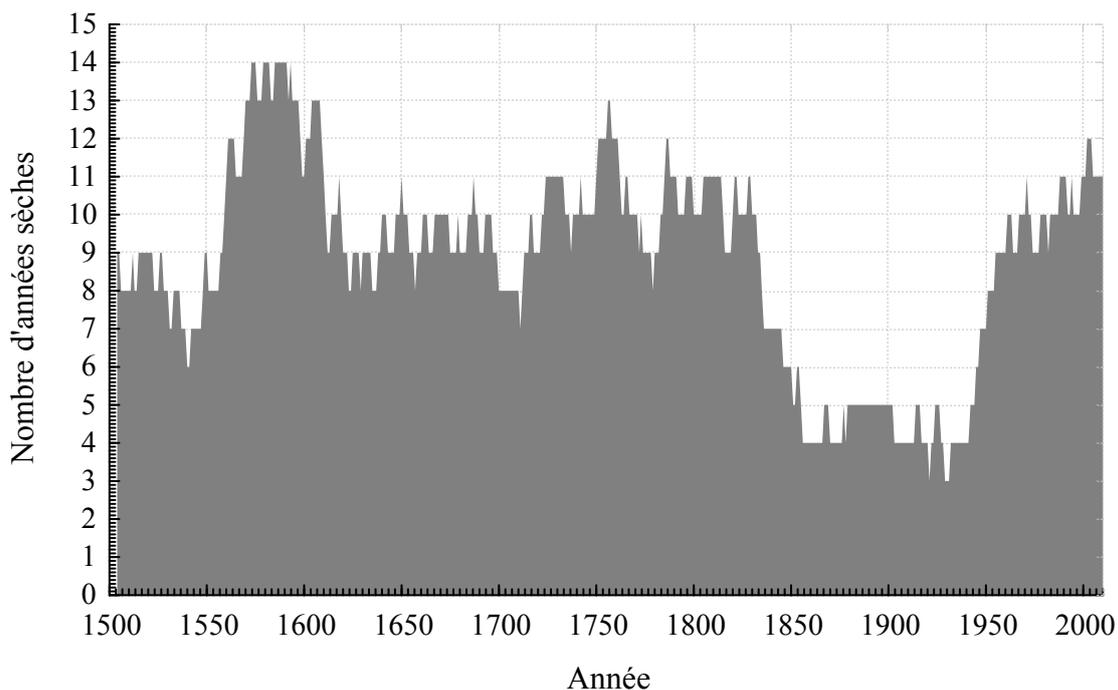
La ligne horizontale discontinue représente la moyenne des précipitations observées d'octobre à juin pour la période 1971-2010 (397.2 mm). La ligne horizontale continue inférieure représente le seuil de sécheresse fixé à 90 % de cette moyenne (357.5 mm). La ligne horizontale continue supérieure représente le seuil d'humidité fixé à 110 % (436.5 mm).

### A. Fréquences des années sèches

La reconstitution des précipitations d'octobre à juin, pour la période 1455-2010, contient 99 années sèches avec un intervalle moyen entre deux années sèches de 5.6 ans et une répartition par siècle comme suit:

- 20 ans au 16<sup>ème</sup> siècle
- 19 ans au 17<sup>ème</sup> siècle
- 21 ans au 18<sup>ème</sup> siècle
- 11 ans au 19<sup>ème</sup> siècle
- 20 ans au 20<sup>ème</sup> siècle

A l'échelle séculaire, à l'exception du 19<sup>ème</sup> siècle, période la plus favorable, la fréquence des années sèches est peu variable (19 à 21). Cependant, si on considère la fréquence par période de 50 ans (Fig. 3.12), la deuxième moitié du 16<sup>ème</sup> siècle semble connaître le nombre d'années sèches le plus élevé (14 ans).



**Figure 3.12:** Evolution du nombre d'années sèches par période de 50 ans. Le nombre d'années est représenté à la fin de la période.

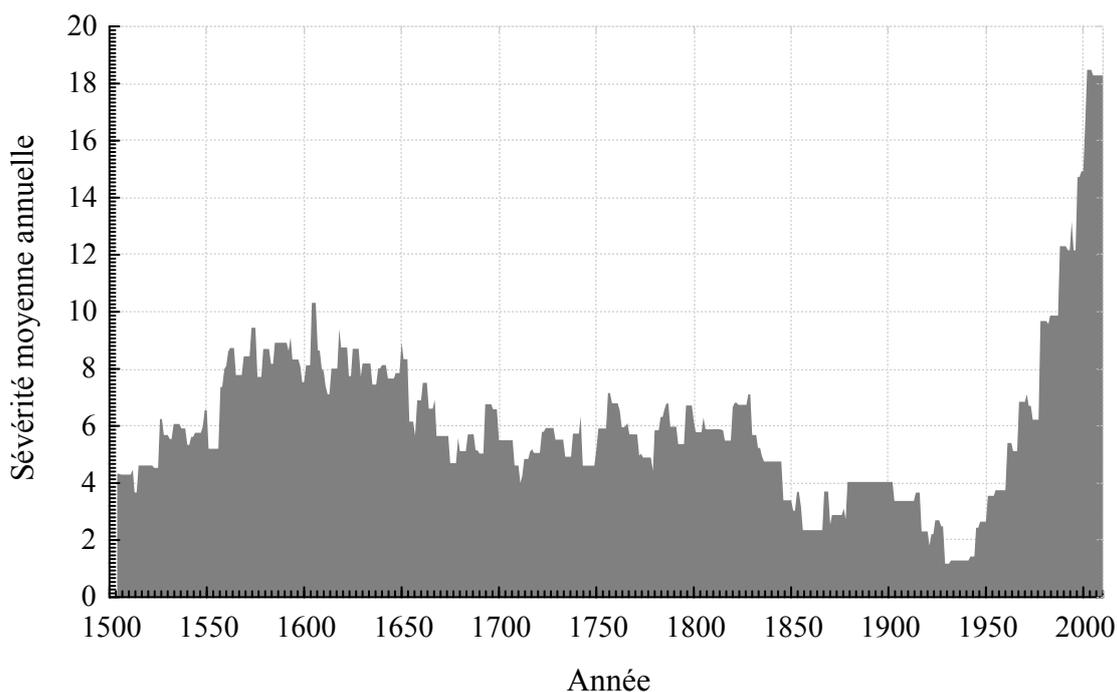
### B. Période des années sèches

Du point de vue de période de sécheresse, la période maximale ne dépasse jamais quatre années depuis 1455, un seul événement a été identifié durant le 16<sup>ème</sup> siècle (1559-1562). Nous avons enregistré 11 événements secs de deux ans et 73 événements d'une année.

### C. Sévérité des années sèches

Si on définit la sévérité d'une année sèche par son déficit par rapport au seuil de sécheresse adopté dans cette étude (90 %), l'année 1978, définie comme l'année de sécheresse la plus sévère avec un déficit de 83 mm et des précipitations de 159 mm, semble précéder l'épisode de dépérissement observé dans les cédraies de l'Aurès (Abdessemed, 1981).

Enfin, si on combine fréquence, période et sévérité de sécheresse en prenant la moyenne mobile des sévérités des années sèches par période de 50 ans, la période 1953-2002 semble être la plus défavorable depuis 1455 (Fig. 3.13).



**Figure 3.13:** Moyenne mobile des sévérités de sécheresse par période de 50 ans. La moyenne est représentée à la fin de la période.

### 3.4. Discussion

Le taux élevé de cernes incomplets, particulièrement dans les peuplements du Chelia, montre que les arbres ont souffert d'un stress d'origine abiotique (climat) ou biotique (insecte défoliateur).

Selon Filion et *al.* (2010), en plus de la formation des cernes incomplets, d'autres indicateurs peuvent caractériser une signature dendrochronologique propre à un épisode de défoliation tels que:

- la présence d'un cerne pâle en raison de la quasi-absence de bois final résultant de la défoliation sévère des arbres. Cependant, ces cernes pâles ne seraient pas diagnostiques d'une défoliation puisqu'ils peuvent se former suite à une contrainte climatique (Morin et *al.*, 2010).

- une réduction de la croissance radiale pendant plusieurs années consécutives peut être le résultat d'une défoliation. Cependant, pour la cédraie du Belezma, selon Kherchouche et *al.* (2013), les arbres morts et vivants se comportent de la même manière jusqu'à leur mort subite qui a eu lieu entre 2001 et 2002 et les arbres vivants ayant connu une récupération après les cernes manquants ne montrent pas de réduction marquée de la croissance.

Dans l'état actuel des connaissances, il est difficile d'attribuer ces signatures dendrochronologiques au climat ou à une défoliation d'insectes. Cependant la comparaison de ces séries dendrochronologiques à des séries d'une espèce non hôte de l'insecte défoliateur, provenant de sites voisins géographiquement, pourra répondre à cette question. Si les séries des deux espèces hôte et non hôte présentent les mêmes signatures, le stress peut être considéré d'origine climatique. Cette méthode est largement employée pour reconstituer les épidémies des insectes défoliateurs (Blais, 1954 in Morin et *al.*, 2010 ; Swetnam et *al.*, 1985 in Filion et *al.*, 2010 ; Schweingruber, 1988 in Filion et *al.*, 2010 ; Levasseur, 2000).

Les résultats de la fonction de réponse mettant en évidence l'effet positif des précipitations, de la saison de croissance et de celle précédente, ont été obtenus pour le cèdre de l'Atlas aussi bien dans son aire naturelle au Maroc (Till, 1987 ; Chbouki, 1994) que dans les reboisements du Sud de la France (Guibal, 1984). Les précipitations automnales et hivernales contribuent dans la reconstitution de la réserve hydrique du sol.

L'effet négatif des hautes températures, associées à une forte évapotranspiration, sur la croissance radiale s'explique par le stress hydrique qu'elles peuvent induire pendant la période de mai-août, période sèche et chaude.

Bien que les périodes de sécheresse identifiées sur la base des précipitations coïncident avec les trois épisodes de dépérissement observés dans la région, particulièrement celui du

19<sup>ème</sup> siècle où on ne dispose pas de données climatiques, la sécheresse a certes sa responsabilité mais elle ne peut être considérée comme cause unique de la mortalité, sinon pourquoi dans les peuplements touchés subsistent-ils des arbres sains juste à côté d'arbres dépérissants?

### 3.5. Conclusion

A travers cette étude dendrochronologique, nous avons mis en évidence une sensibilité élevée des arbres aux fluctuations climatiques annuelles avec un synchronisme marqué dans la réponse au climat et des arrières effets climatiques par une utilisation non négligeable des réserves de l'arbre des années précédentes. Cet effet pourrait probablement atténuer les effets de la sécheresse de courte période et de sévérité modérée si les conditions antérieures sont favorables.

La formation des cernes incomplets sur des arbres encore vivants montre que le cèdre de l'Atlas est en mesure de récupérer et de reprendre son rythme normal de croissance après des périodes de contrainte biotique ou abiotique difficiles.

L'établissement de la fonction de réponse a montré une forte sensibilité de la croissance du cerne aux précipitations, non seulement par une réponse immédiate aux précipitations de la saison de croissance, mais aussi à celles d'automne et d'hiver précédents qui contribuent dans la reconstitution de la réserve hydrique du sol et assurent ainsi une disponibilité en eau lors du démarrage de la mise en place du cerne. Des études sur l'écophysiologie du cèdre et des conditions hydriques du sol, comme la réserve utile combinée avec les conditions climatiques (bilan hydrique) peuvent constituer des outils intéressants qui nous permettent de compléter les informations données par la fonction de réponse et de comprendre mieux les conditions stationnelles de croissance et les contraintes auxquelles l'arbre est soumis.

Bien que la comparaison des cèdres morts aux cèdres sains, ne montre pas de différence significative au niveau de la croissance du cerne, et bien que les trois épisodes de dépérissement signalés aient été précédés par des événements secs et que la période 1953-2002 semble être la plus sèche depuis 1455, il n'est pas pertinent d'attribuer cette mortalité à la sécheresse comme facteur unique. D'autres facteurs peuvent affecter la croissance du cerne, comme les insectes défoliateurs. Pour interpréter au mieux les différentes signatures dendrochronologiques, il est indispensable de mener en parallèle une étude comparée sur d'autres espèces non hôtes d'insecte défoliateur du cèdre de l'Atlas afin de déterminer la part de responsabilité de chacun des deux facteurs.

D'un point de vue méthodologique, l'étude des cernes est très intéressante dans la mesure où elle fournit des informations rétrospectives des réponses fonctionnelles de l'arbre. Cette étude a mis en évidence une part de responsabilité de la sécheresse dans le déclenchement du dépérissement mais reste incapable à elle seule d'expliquer le processus. Vu la multiplicité des facteurs pouvant être impliqués dans le phénomène de dépérissement, seule une approche multidisciplinaire introduisant les différents facteurs pourra faire un bon diagnostic afin d'élaborer des outils de gestion face à ce fléau.

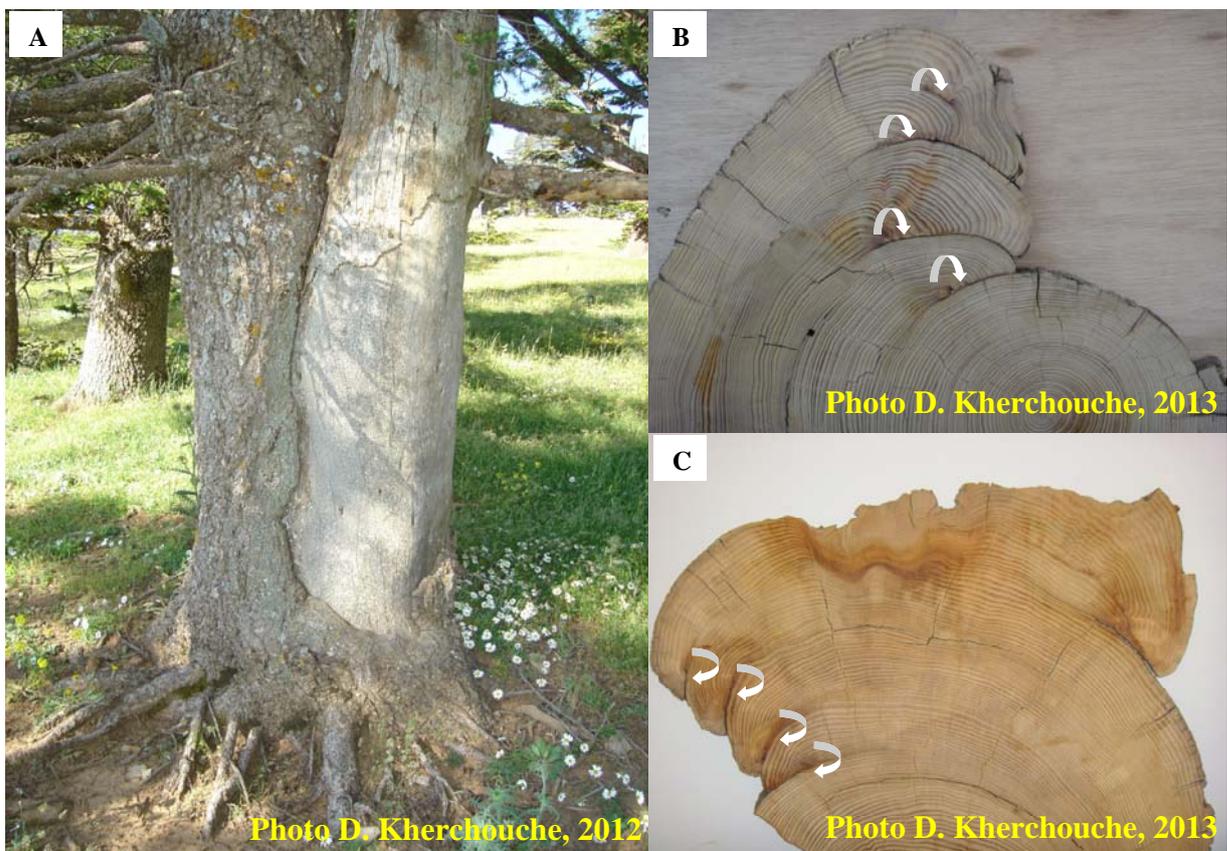
## **Quatrième chapitre**

# **Facteurs de dépérissement du cèdre dans l'Aurès: Approche sylvicole**

#### 4.1. Introduction

Pour une gestion sylvicole adaptée à la station, la sylviculture appliquée doit tenir compte du phénomène de concurrence et de compétition entre les arbres d'un même peuplement. Afin d'évaluer l'importance de cette compétition plusieurs indices ont été développés par les sylviculteurs. Dans ce travail, pour déterminer le degré de compétition et son impact sur la mortalité observée au niveau des peuplements de cèdre nous avons utilisé deux indices indépendants de distances entre les arbres, un indice arbre et un indice peuplement.

Un deuxième paramètre considéré dans cette étude est l'écorçage des arbres (Fig. 4.1, 4.2), souvent pratiqué par l'homme, soit pour la préparation artisanale des peaux soit dans le but d'entraîner la mort de l'arbre et de l'exploiter en tant que bois mort sans être verbalisé (Abdessemed, 1981). Une deuxième cause des dommages de l'écorce est le feu dont les cicatrices sont facilement reconnaissables par leur forme. Ces mutilations de l'écorce ont fait l'objet de plusieurs études dont on peut citer (Ababneh, 2006). Selon Delwaide et Filion (2010), les cicatrices de feu sont parmi les plus étudiées (Payette et *al.*, 1989).



**Figure 4.1:** Mutilations de l'écorce. A: Arbre sur pied écorcé. B-C: Cicatrices de feux sur sections transversales prélevées de souches de cèdre au Chelia.



**Figure 4.2:** Contraste dans une même station entre deux bouquets de cèdres, l'un totalement dépéris avec des mutilations d'écorce (à droite), et l'autre bien venant croissant sur dalle calcaire fissurée sans mutilations d'écorce (à gauche).

Compte tenu de la complexité et l'interaction entre les différents facteurs pouvant être mis en jeu dans le phénomène du dépérissement, une analyse multidimensionnelle s'avère nécessaire. En plus des deux facteurs suscités, d'autres paramètres sylvicoles sont pris en considération tels que l'âge, la surface terrière à l'hectare, la densité du peuplement.

## 4.2. Méthodologie

### 4.2.1. Echantillonnage

La relation compétition-mortalité nécessite dans ce genre d'étude l'utilisation d'un échantillonnage dirigé. Ce type d'échantillonnage, justifié par la discontinuité des peuplements de cèdre, permet aussi de couvrir les différentes gammes de variabilité du taux de mortalité des peuplements. Au total 38 placettes, de forme circulaire et de surfaces variables suivant la densité du peuplement, ont été installées proportionnellement à la surface occupée par l'espèce dans les cédraies les mieux conservées de la région: 21 placettes dans la cédraie des Ouled-Yaâgoub et 17 dans celle du Chelia.

### 4.2.2. Données récoltées

Dans chaque placette d'échantillonnage, nous avons mesuré le diamètre à 0.30 m, le diamètre à 1.30 m et le diamètre du houppier de tous les arbres.

Sur l'arbre de surface terrière moyenne, nous avons prélevé une carotte à 1.30 m du sol pour estimer l'âge du peuplement.

Nous avons aussi noté l'état sanitaire de tous les arbres qu'ils soient morts ou vivants ainsi que la présence de cicatrices importantes.

Les caractéristiques écologiques stationnelles les plus déterminantes, tels que l'altitude, la pente et l'exposition sont aussi prises en compte.

### 4.2.3. Paramètres calculés

Les données récoltées sur le terrain ont fait l'objet de transformations suivantes:

#### 4.2.3.1. Surface terrière à l'hectare ( $g_{ha}$ )

$$g_{ha} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^N g_i$$

$N$  = nombre d'arbres par placette ;  $g_i$  = surface terrière de l'arbre  $i$  ;  $S$  = surface de la placette en hectares.

**4.2.3.2. Diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne ( $D_g$ )**

$$D_g = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2}$$

$d_i$  = diamètre à 1.30 m du sol de l'arbre  $i$  ;  $N$  = nombre d'arbres par placette

**4.2.3.3. Densité à l'hectare ( $N_{ha}$ )**

$$N_{ha} = \frac{N}{S}$$

$N$  = nombre d'arbres par placette ;  $S$  = surface de la placette en hectares.

**4.2.3.4. Taux de mortalité ( $M(\%)$ )**

$$M(\%) = \frac{N_m \cdot 100}{N}$$

$N_m$  = nombre d'arbres morts par placette ;  $N$  = nombre d'arbres par placette

**4.2.3.5. Taux d'écorçage ( $Ec(\%)$ )**

$$Ec(\%) = \frac{N_{Ec} \cdot 100}{N}$$

$N_{Ec}$  = nombre d'arbres écorcés par placette ;  $N$  = nombre d'arbres par placette

**4.2.3.6. Indices de compétition**

Pour déterminer le degré de compétition entre les arbres du peuplement et son impact sur la mortalité, deux indices de compétition sont pris en compte. Le choix de ces indices repose sur la nature des données récoltées au niveau des placettes.

**A. Indice arbre ( $IC$ )**

Le potentiel de concurrence d'un arbre peut être exprimé en comparant la dimension de cet arbre à la distribution des dimensions de tous ceux constituant le peuplement auquel il appartient. Nous avons donc utilisé un indice basé sur la grosseur des arbres, qui correspond au rapport existant entre la surface terrière de l'arbre en question et la surface terrière de l'arbre moyen (arbre de surface terrière moyenne):

$$IC = \frac{g_i}{\bar{g}} \quad (\text{Rondeux, 1999})$$

$g_i$  = surface terrière de l'arbre  $i$  ;  $\bar{g}$  = surface terrière moyenne du peuplement

Cet indice montre que l'arbre est d'autant plus compétitif et vigoureux que ce rapport est élevé. Cependant des arbres de faible diamètre peuvent être considérés comme dominants ou codominants au sein de peuplements peu réguliers (Rondeux, 1999).

Prenant comme limite de compétitivité la valeur de 1, un arbre sera concurrencé ou compétitif suivant que sa valeur d'indice de compétition est inférieure ou supérieure à cette limite.

### B. Indice peuplement (CCF)

A l'échelle du peuplement, nous avons utilisé le facteur de compétition des houppiers (CCF, *crown competition factor*) qui se base sur la surface (supposée circulaire) maximale de houppier (*MCA*, *maximum crown area*) en m<sup>2</sup> des arbres. Cet indice est le rapport exprimé en pourcentage entre la somme des *MCA* des arbres et la surface du peuplement, il correspond à:

$$CCF = \frac{100}{S} \left( \sum_{i=1}^N MCA_i \right) \quad (\text{Rondeux, 1999})$$

- $S$  = surface du peuplement,
- $MCA_i = \frac{\pi \cdot dh_i^2}{4}$  ( $dh_i$  = diamètre du houppier)
- $N$  = Nombre d'arbres par placette

Le facteur de compétition peut s'écrire:

$$CCF = \frac{25\pi}{S} \left( \sum_{i=1}^N dh_i^2 \right)$$

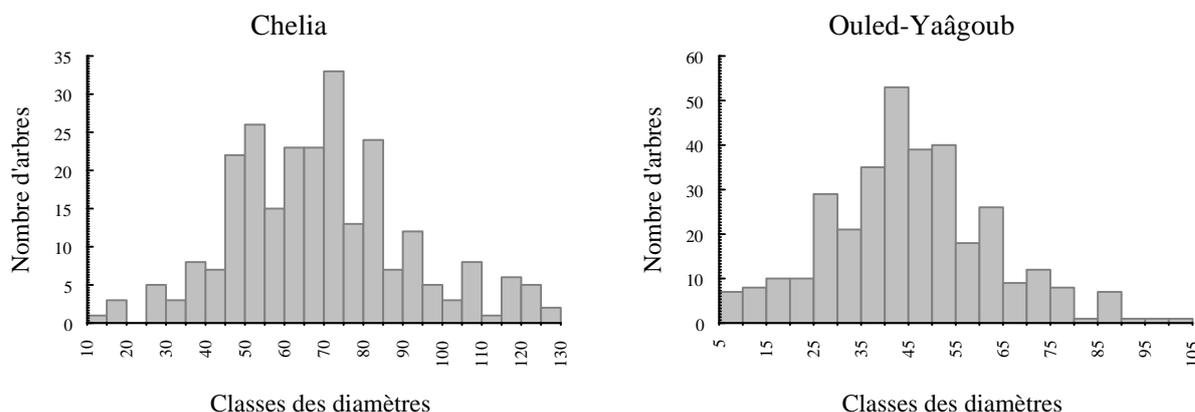
Pour la majorité des espèces, les arbres d'un peuplement qui se sont développés sans concurrence et qui ont atteint le stade de fermeture du couvert, sont caractérisés par un facteur de 100 %. La concurrence est d'autant plus accentuée que ce même facteur est élevé (Husch et al., 1972).

### 4.3. Résultats et discussion

#### 4.3.1. Structure du peuplement

La structure des peuplements étudiés peut être définie à travers la répartition des arbres par classes des diamètres (Fig. 4.3). Le peuplement est considéré comme équienné si cette répartition suit une loi normale. Plusieurs tests permettent de chiffrer dans quelle mesure une distribution observée se rapproche de la distribution normale.

Nous avons utilisé un test de conformité qui consiste à calculer le coefficient de dissymétrie de Fisher  $\sqrt{b_1}$  et celui d'aplatissement de Pearson  $b_2$  et de vérifier si le point de coordonnées  $(\sqrt{b_1}, b_2)$  se trouve ou non dans la région d'acceptation correspondante qui est présentée sous forme d'abaques (Dagnelie, 1998). Les résultats de ce test sont présentés dans le tableau 4.1.



**Figure 4.3:** Répartition des arbres par classes des diamètres.

**Tableau 4.1:** Coefficients de dissymétrie et d'aplatissement et limites d'acceptation des diamètres à 1.30 m du sol.

Massif	$\sqrt{b_1}$	$b_2$	Effectif	Limites d'acceptation au niveau de probabilité de 0.05
Chelia	0.35	3.17	255	2.40 - 3.95
Ouled-Yaâgoub	0.34	3.38	336	2.45 - 3.80

La consultation des abaques de Bowman et Shenton (Dagnelie, 1998) montre qu'au niveau de probabilité 0.05, les deux points appartiennent à la région d'acceptation, les peuplements des deux massifs peuvent être considérés comme équiennés.

### 4.3.2. Relations mathématiques

Les équations des deux relations,  $D_{1.30}-D_{0.30}$  et  $D_{\text{houpp}}-D_{1.30}$ , les critères de précision ( $R^2$ , CVR (%)) ainsi que le critère de validité des équations sont illustrés dans le tableau 4.2. Pour la validité du modèle et à défaut d'échantillon de validité, le critère  $R^2$  de prédiction est déterminé à l'aide d'une technique reposant sur la prédiction des observations non incluses dans la construction du modèle dont la procédure a été décrite dans le chapitre 3.

La similarité des coefficients de détermination de prédiction et d'ajustement (tableau 4.2) justifie la validité des modèles.

La relation  $D_{1.30}-D_{0.30}$  permet d'estimer le diamètre à 1.30 m du matériel prélevé en fonction du diamètre à 0.30 m des souches, tandis que la relation  $D_{\text{houpp}}-D_{1.30}$  permet d'avoir une estimation du diamètre du houppier de l'arbre seulement en connaissant son diamètre à 1.30 m du sol.

**Tableau 4.2:** Critères de précision et de validité des relations  $D_{1.30}-D_{0.30}$ ,  $D_{\text{houpp}}-D_{1.30}$ .

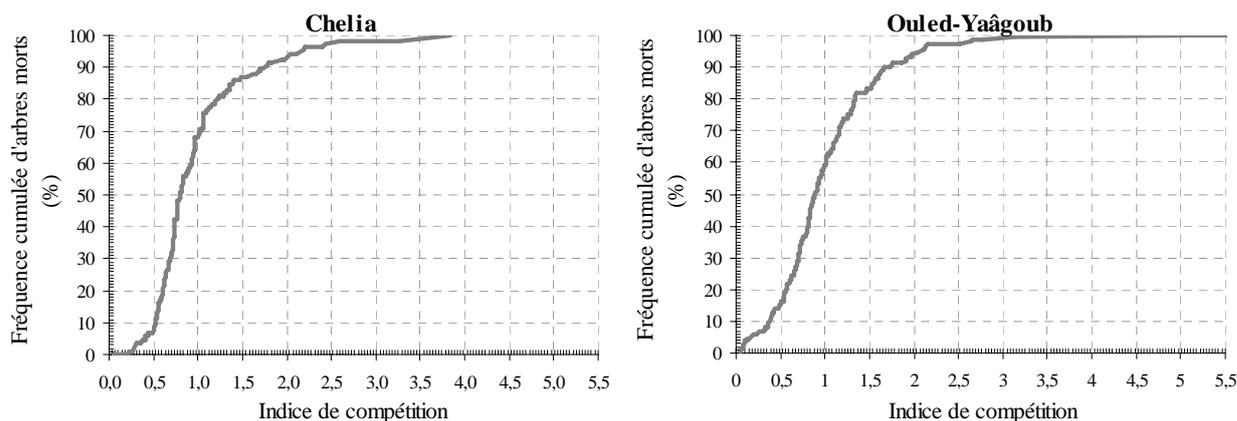
Massif	Relation	a	b	R <sup>2</sup> d'ajustement	CVR (%)	R <sup>2</sup> de prédiction
Chelia	$D_{1.30} = a + b.D_{0.30}$	-0.7307	0.8687	0.9280	8.79	0.9267
	$D_{\text{houpp}} = a + b.D_{1.30}$	2.4681	0.1029	0.4930	23.95	0.4854
O. Yaâgoub	$D_{1.30} = a + b.D_{0.30}$	2.9699	0.8324	0.9430	9.21	0.9410
	$D_{\text{houpp}} = a + b.D_{1.30}$	1.1417	0.1205	0.5330	29.85	0.5278

### 4.3.3. Relation mortalité-compétition

#### 4.3.3.1. A l'échelle de l'arbre

L'examen de la figure 4.4 montre que les courbes d'évolution du taux cumulé de mortalité suivent la même tendance avec trois phases distinctes:

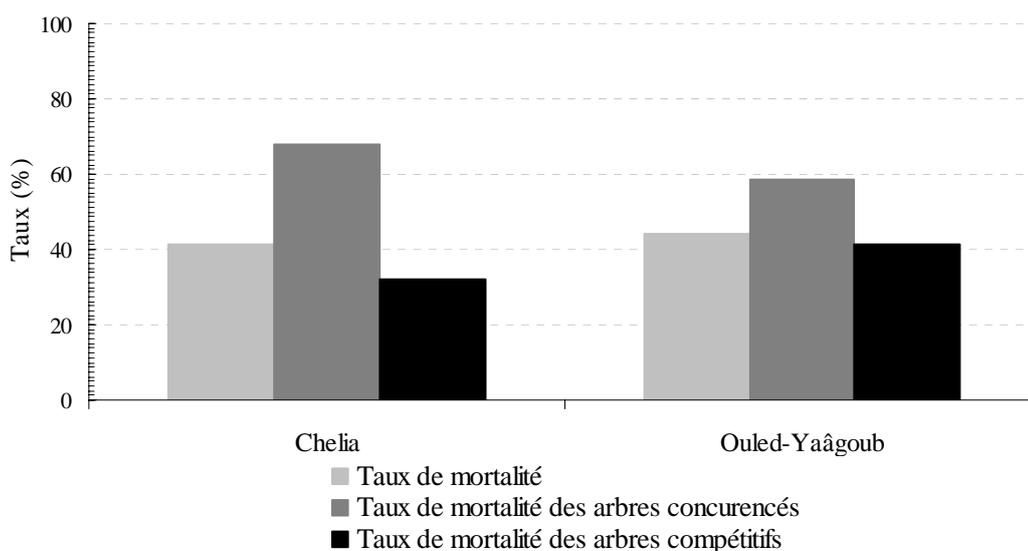
- La première phase présente une pente forte jusqu'à un nombre cumulé d'arbres morts équivalent à 68 % pour le massif du Chelia et 59 % pour celui des Ouled-Yaâgoub. Ce taux de mortalité correspond à un indice de compétition égal à 1; valeur limite déjà fixée entre arbres concurrencés et arbres compétitifs.
- La deuxième phase correspond à une pente relativement légère jusqu'à une valeur d'un indice de compétition de 2.5 pour les deux massifs.
- Enfin la dernière phase est représentée par un pallier qui correspond à une absence de mortalité.



**Figure 4.4:** Evolution du taux cumulé de mortalité en fonction de l'indice de croissance.

De la figure 4.5, il ressort que pour un taux de mortalité très peu variable, 42 % dans le Chelia et 44 % dans les Ouled-Yaâgoub, les arbres concurrencés dans le premier massif représentent 68 % de la mortalité comparativement à ceux des Ouled-Yaâgoub avec un taux de 59 %. Ce constat reflète probablement un manque d'espace vital de croissance au niveau du Chelia qui fait que les peuplements sont soumis à des compétitions intenses. La surface terrière moyenne de ces peuplements est de 89 m<sup>2</sup>/ha, tandis que celle des peuplements des Ouled-Yaâgoub n'est que de 37 m<sup>2</sup>/ha.

Le coefficient de corrélation de point (Dagnelie, 1998) entre l'état sanitaire et la compétition est significatif (au niveau 0.05) avec une valeur de 0.17 pour les peuplements du Chelia, mais très faible avec une valeur de 0.045 non significative (au niveau 0.05) pour les peuplements des Ouled-Yaâgoub.



**Figure 4.5:** Taux de mortalité des arbres concurrencés et compétitifs.

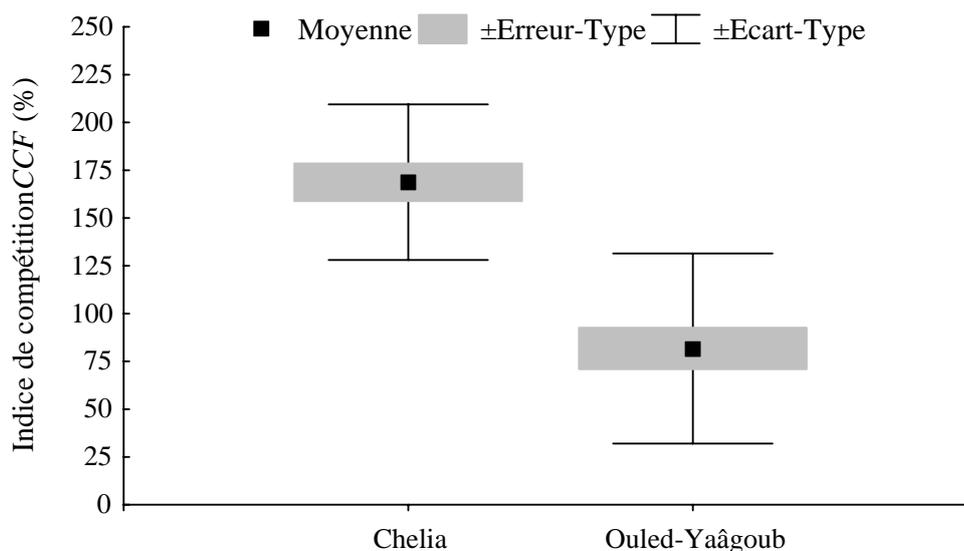
Les mortalités enregistrées au niveau des arbres compétitifs, 32% (Chelia) et 41% (Ouled-Yaâgoub), montrent que la compétition n'est pas le seul facteur responsable dans la mortalité des arbres.

#### 4.3.3.2. A l'échelle du peuplement

L'analyse de l'indice de compétition *CCF* (*crown competition factor*) indique une grande variabilité de ce paramètre (Fig. 4.6). La valeur moyenne de 82 % obtenu pour les peuplements des Ouled-Yaâgoub indique que les peuplements n'ont pas encore atteint le degré de fermeture. Par contre au niveau des peuplements du Chelia, la valeur de *CCF* moyen de 162 %, largement supérieure à 100 %, montre en effet que la concurrence entre les arbres est très intense, les peuplements ont atteint le degré de fermeture et les branches commencent à se superposer.

La comparaison de moyennes par le test de *Student* (Dagnelie, 1998) a montré une différence très hautement significative ( $t_{obs} = 5.81$ ,  $t_{thé} = 3.59$  au seuil de 0.0005).

Cependant le coefficient de corrélation entre le taux de mortalité et la compétition exprimée par le facteur *CCF* est de 0.21 pour les peuplements du Chelia et de -0.46 pour ceux des Ouled-Yaâgoub. Bien que l'indice de compétition de peuplement au niveau du Chelia est très élevé, la corrélation entre cet indice et le taux de mortalité n'est pas significative. Cela peut être expliqué par le fait que la relation entre la compétition et la mortalité n'est pas directe, la compétition entre les arbres peut constituer un facteur de prédisposition.

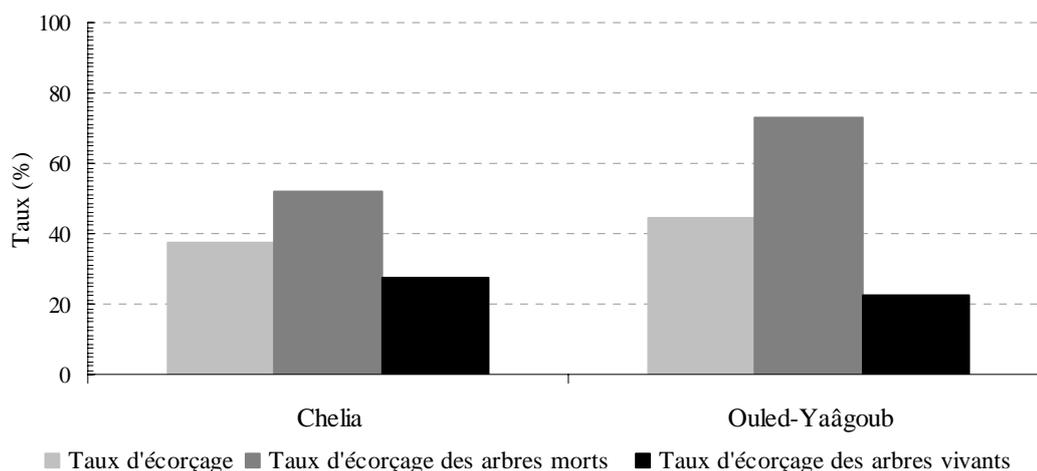


**Figure 4.6:** Indice de compétition *CCF* de peuplement.

### 4.3.4. Relation mortalité-Ecorçage

#### 4.3.4.1. A l'échelle de l'arbre

L'écorçage peut être aussi un facteur de mortalité des arbres. En effet les mutilations de l'écorce affectent une grande partie des arbres, 38 % dans le Chelia et 45 % dans les Ouled-Yaâgoub (Fig. 4.7).



**Figure 4.7:** Taux d'écorçage des arbres morts et vivants.

Le coefficient de corrélation de point (Dagnelie, 1998) entre la mortalité et l'écorçage est significatif pour les deux massifs, 0.25 (Chelia) et 0.51 (Ouled-Yaâgoub).

Selon Larson (1994), en plus de la dessiccation des tissus du xylème exposés par les mutilations de l'écorce, les bulles d'air peuvent occuper le lumen de la cellule et bloquer la conduction de la sève brute vers les feuilles.

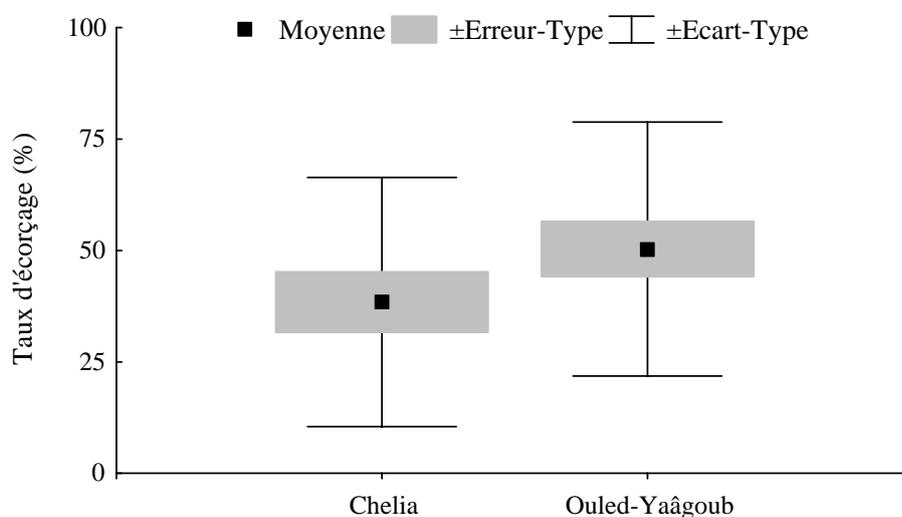
En conditions de déficit hydrique, la perte de la conductivité hydraulique dans la partie du tronc écorcé accentue le stress hydrique auquel le système foliaire répond par une réduction de son potentiel hydrique et son activité photosynthétique par la fermeture des stomates. Cette réaction se traduit par une réduction de la croissance radiale des arbres, comme il a été démontré par la comparaison des arbres écorcés à des arbres sans blessure d'écorce (Larson, 1994).

L'écorçage des arbres est donc un facteur qui peut agir à plusieurs niveaux. Il peut constituer un facteur prédisposant des arbres au dépérissement et contribuer dans le déclenchement du phénomène en accentuant le stress hydrique. Il peut éventuellement aggraver le phénomène, si des années de sécheresse se succèdent.

#### 4.3.4.2. A l'échelle du peuplement

L'analyse du taux d'écorçage des peuplements montre une valeur moyenne de 38 % pour les peuplements du Chelia et 50 % pour ceux des Ouled-Yaâgoub (Fig. 4.8), ce qui confirme que les peuplements des Ouled-Yaâgoub sont plus affectés par ce phénomène. Le coefficient de corrélation entre le taux de mortalité et le taux d'écorçage dans ce massif atteint 0.87, tandis que dans le massif du Chelia on n'a enregistré qu'une valeur de 0.30.

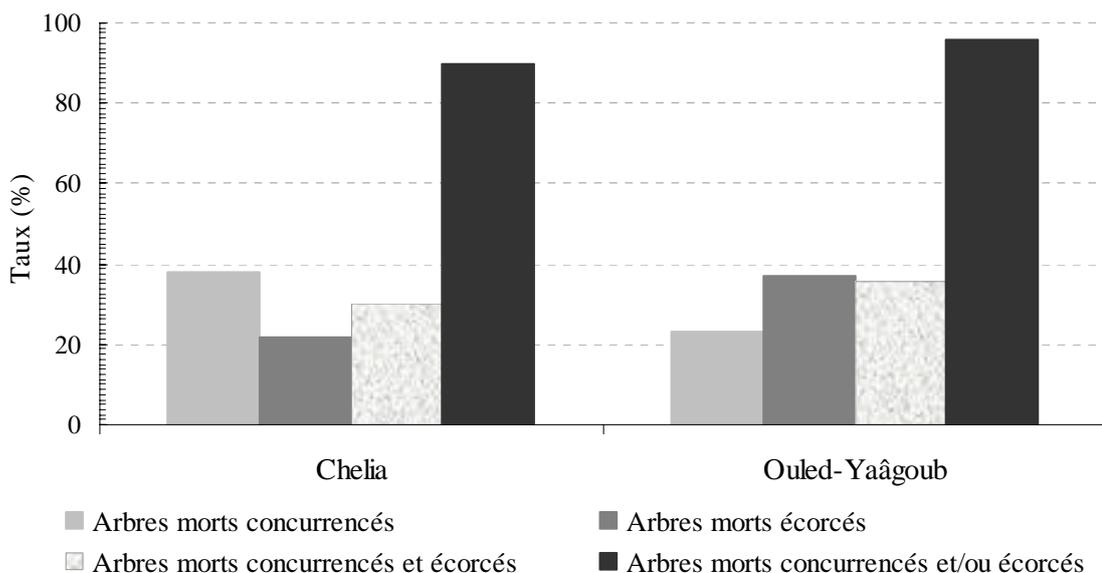
La comparaison de moyennes par le test de *Student* a montré une différence non significative ( $t_{obs} = 1.68$  au seuil de 0.05).



**Figure 4.8:** Taux d'écorçage des peuplements.

#### 4.3.5. Mortalité-compétition-écorçage

Compte tenu de l'aspect relationnel complexe des paramètres pouvant intervenir dans la mortalité des arbres, il semble utile de considérer ces deux facteurs (écorçage et compétition) simultanément à l'échelle de l'arbre. La figure 4.9 montre que 90 % (Chelia) et 96 % (Ouled-Yaâgoub) des arbres morts sont concurrencés et/ou écorcés et seulement 10 % (Chelia) et 4 % (Ouled-Yaâgoub) dérogent à cette règle. Ceci montre que la mortalité des arbres revient non seulement aux facteurs de compétitivité et d'écorçage mais à d'autres facteurs tels que la sénescence des arbres, l'écimage etc...



**Figure 4.9:** Mortalité-compétition-écorçage.

#### 4.3.6. Analyse multivariable (analyse en composantes principales)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique multidimensionnelle qui s'applique sur des variables exclusivement quantitatives. Basée sur la corrélation linéaire, l'ACP consiste à substituer des variables initiales inter-corrélées par un nombre réduit de nouvelles variables non corrélées entre elles appelées composantes principales. Nous avons de ce fait utilisé cette méthode pour décrire les peuplements échantillonnés en fonction des variables retenues dans cette étude.

Etant donné que le facteur de compétition est un paramètre indicateur des caractéristiques dendrométriques des peuplements, seules les variables suivantes ont été introduites comme variables actives dans l'analyse: le taux de mortalité, le taux d'écorçage, le facteur de compétition (*CCF*) et l'âge du peuplement. Les autres variables sont considérées comme supplémentaires.

Dans cette analyse nous avons combiné les 38 peuplements échantillonnés dans les deux massifs, Chelia et Ouled-Yaâgoub.

Du tableau 4.3, il ressort que le taux de mortalité ( $M$  (%)) montre une corrélation positive significative, avec l'âge et le taux d'écorçage, mais négative avec la densité. Cette corrélation négative est expliquée par le fait que les peuplements les plus denses sont des peuplements jeunes avec des taux de mortalité faibles à nuls.

Les deux premiers axes contribuent à eux seuls pour 79 % (57.5 % + 21.9 %) de la variation totale. Ainsi l'interprétation portera sur ces deux axes.

**Tableau 4.3:** Matrice des corrélations des variables initiales.

	M (%)	CCF	Ec	Age	Dg	G/Ha	N/Ha
M (%)	1,00						
CCF	-0,20	1,00					
Ec (%)	<b>0,64</b>	-0,27	1,00				
Age	<b>0,73</b>	-0,27	<b>0,36</b>	1,00			
Dg	0,15	<b>0,53</b>	-0,10	<b>0,36</b>	1,00		
G/Ha	-0,09	<b>0,88</b>	-0,19	-0,09	<b>0,65</b>	1,00	
N/Ha	<b>-0,41</b>	<b>0,46</b>	-0,22	<b>-0,63</b>	<b>-0,39</b>	<b>0,37</b>	1,00

La figure 4.10 relative au cercle de corrélations, permet de constater que:

- La première composante est très corrélée négativement avec le taux de mortalité, l'âge et le taux d'écorçage. Cela signifie que les mortalités les plus élevées sont enregistrées dans les peuplements les plus âgés et présentant un taux d'écorçage élevé qui seront placés sur la partie négative de l'axe 1.
- La deuxième composante est corrélée positivement avec le facteur de compétition (CCF) comme variable active, le diamètre de surface terrière moyenne (Dg) et la surface terrière à l'hectare (G/Ha) comme variables supplémentaires. Cette composante explique le degré de compétition entre les arbres, cela signifie que plus la compétition est intense, plus le peuplement sera placé sur la partie positive de l'axe 2.

La projection des 38 placettes sur le plan factoriel (1 x 2) (Fig. 4.11) nous permet de distinguer trois groupes:

- un premier groupe placé à droite de l'axe 1 composé par des peuplements témoins avec un taux de mortalité nul à faible, inférieur à 10 %. Il s'agit des peuplements bien portants, avec des taux d'écorçage faibles ou nuls et des degrés de compétition variables, de 60 % (O12) à 230 % (C7).

Selon ce facteur, deux sous-groupes se différencient. Le premier est composé exclusivement par des peuplements des Ouled-Yaâgoub n'ayant pas encore atteint le degré de fermeture, alors que le second groupe contient des peuplements qui ont dépassé largement le seuil de compétition avec des taux de mortalité faibles, dont la figure 4.12 illustre bien ce constat.

- Un deuxième groupe, composant la partie positive de l'axe 2, est constitué en majorité par des peuplements du Chelia. Ce groupe comprend des peuplements âgés soumis à des compétitions intenses avec des taux de mortalité importants dépassant les 60 %.
- Le dernier groupe, situé sur la partie gauche de l'axe 1, est formé exclusivement par des peuplements appartenant au massif des Ouled-Yaâgoub. Il s'agit des peuplements âgés où le taux de mortalité est élevé malgré l'absence du phénomène de compétition.

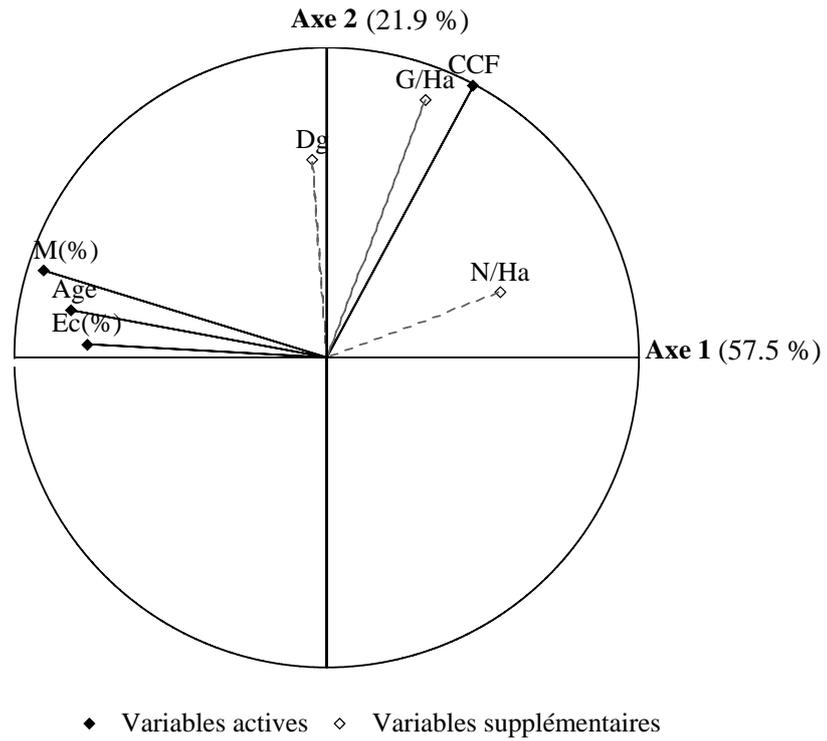


Figure 4.10: Cercle de corrélations.

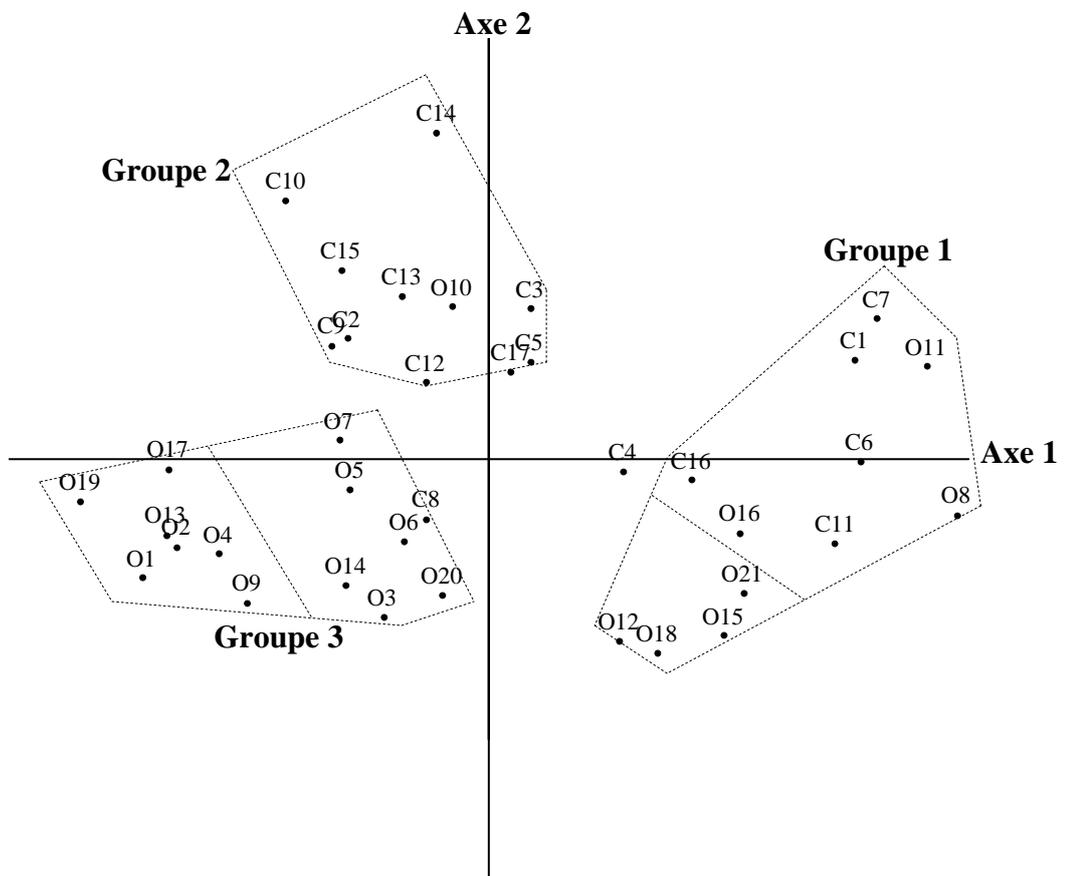


Figure 4.11: Projection des peuplements dans le plan factoriel (1 x 2)

Dans ce groupe, on peut distinguer deux sous groupes: le premier (à gauche) composé de peuplements à taux de mortalité variant de 90 à 100 %, le second, situé à droite, se caractérise par un taux de mortalité inférieur à 60 %.



**Figure 4.12:** Peuplement jeune témoin (bien portant) à Taâfist (Feraoun, Ouled-Yaâgoub) malgré une compétition et une densité très élevées.

#### 4.4. Conclusion

A travers cette étude, nous pouvons conclure que l'âge des peuplements est le facteur prédisposant le plus explicatif de la mortalité des arbres.

La compétition semble jouer un rôle dans la mortalité des arbres dans le massif du Chelia où la majorité des peuplements ont dépassé largement le degré de fermeture estimé à 100 % du facteur de compétition du peuplement, *CCF*. Cependant des peuplements jeunes échappent à ce phénomène malgré l'état de l'intense compétition auquel les arbres sont soumis.

Dans le massif des Ouled-Yaâgoub, la majorité des peuplements bénéficient d'un espace vital suffisant. Des peuplements jeunes, très denses soumis à des compétitions très intenses sont bien portants. Seuls les arbres vulnérables par leur état d'âge avancé sont dépéris.

Quant à l'écorçage, qui affecte une grande partie des arbres dans les deux massifs, il semble jouer un rôle létal particulièrement dans les Ouled-Yaâgoub où 45 % des arbres présentent des mutilations d'écorce.

Il est à noter que ces facteurs, pris individuellement, n'agissent pas de la même manière d'une station à l'autre en raison de l'interaction et de la compensation entre eux et avec d'autres facteurs.

# **Conclusion générale**

## CONCLUSION GENERALE

L'étude du climat actuel de l'Aurès a montré que la cédraie se situe dans des conditions de plus en plus défavorables. La sécheresse caractérisée par le nombre de mois secs ( $P < 2T$ ) successifs pour la période 1950-2011 semble s'accroître avec le temps. Le cèdre est placé dans des conditions de déficit hydrique durant toute la saison de croissance où les végétaux souffrent d'un manque d'humidité et d'une hausse des températures. Ce déficit peut affecter la période de repos végétative mais avec des fréquences beaucoup plus basses.

L'analyse pédoanthracologique a confirmé que la superficie occupée par le cèdre actuellement dans l'Aurès ne correspond pas à son aire naturelle. La recherche de la présence ancienne du cèdre dans six stations localisées sur les marges méridionales du massif de l'Aurès s'avère positive pour la moitié des stations prospectées. Les deux premières concernent le Djebel Zellatou, milieu totalement asylvatique au voisinage du Sahara. La troisième station est celle de Ras-Bignoun (Beni-Imloul) où l'espèce dominante est le pin d'Alep et dont la toponymie atteste de l'existence du cèdre. Dans le reste des stations, l'absence du charbon de cèdre peut être due aux caractéristiques défavorables à un bon enregistrement du signal phytohistorique tel que la forte pente. Il serait donc intéressant de rechercher des sols favorables pour les stations de Djebel Mehmel, Ras-Tadjine et Djebel Djehfa et réaliser des sondages plus méridionaux sur le Djebel Taktiout et la crête de l'Ahmar Khaddou.

L'étude dendroclimatologique du cèdre menée dans les deux forêts les mieux conservées de la région (Chelia et Ouled-Yaâgoub) a permis d'élaborer une chronologie de 556 ans (1455-2010).

Le taux élevé de cernes incomplets, particulièrement dans le Chelia, montre que les arbres ont souffert d'un stress d'origine abiotique (climat) ou biotique (insecte défoliateur). Dans l'état actuel des connaissances, il est difficile d'attribuer ces signatures dendrochronologiques au climat ou à une défoliation d'insectes. Pour répondre à cette question, il serait intéressant de comparer ces séries dendrochronologiques à des séries, d'une espèce non hôte de l'insecte défoliateur du cèdre, provenant de sites géographiquement voisins. Si les séries des deux espèces hôte et non hôte présentent les mêmes signatures, le stress peut être considéré d'origine climatique.

La formation de cernes incomplets sur des arbres encore vivants montre que le cèdre est en mesure de récupérer et de reprendre son rythme normal de croissance après des périodes de contrainte biotique ou abiotique difficiles.

L'analyse de la chronologie élaborée a montré que le cèdre est très sensible aux fluctuations climatiques annuelles et plus particulièrement les précipitations avec une sensibilité moyenne de 0.26. Cette sensibilité semble augmenter durant la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle pour atteindre le double durant les 20 dernières années.

Cette approche a mis en évidence une utilisation non négligeable des réserves de l'arbre des années précédentes, ce qui pourrait probablement atténuer les effets de la sécheresse de courte période et de sévérité modérée si les conditions antérieures sont favorables.

La fonction de réponse du cèdre dans l'Aurès a montré que le cèdre réagit positivement aux précipitations, non seulement de la saison de croissance mais aussi de celle du repos végétatif qui interviennent dans la reconstitution de la réserve hydrique du sol.

Quant aux températures, le cèdre semble être inversement sensible aux températures de mai à août. Les hautes températures, associées à une forte évapotranspiration, ont un effet négatif sur la croissance du cerne.

La fonction de transfert exprimant les précipitations en fonction de l'indice de croissance, appliquée à la chronologie élaborée, a permis de reconstituer les précipitations et les années sèches depuis 1455 en prenant comme seuil de sécheresse 90 % de la moyenne des précipitations observées.

L'analyse de la répartition temporelle des années sèches a montré qu'en termes de fréquence le 16<sup>ème</sup> siècle contient le nombre le plus élevé en années sèches. La période la plus longue de sécheresse ne dépasse jamais 4 ans, un seul événement a été enregistré durant ce siècle, il s'agit de la période 1559-1562. Par contre en termes de sévérité de la sécheresse, la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle est la plus défavorable durant laquelle les arbres ont répondu par une forte sensibilité jamais observée depuis 1455.

Bien que tous les épisodes de mortalité, signalés depuis environ un siècle, coïncident avec des périodes de sécheresse, ce facteur ne doit pas être considéré comme déterminant du phénomène de dépérissement.

L'étude de la compétition des peuplements à travers deux indices indépendants de distances entre les arbres, l'indice *IC* à l'échelle de l'arbre et le *CCF* (facteur de compétition des houppiers) à l'échelle du peuplement, montre que la compétition joue un rôle important dans la mortalité des arbres spécialement dans le massif du Chelia où les peuplements

dépassent largement le degré de fermeture correspondant à un CCF de 100 %. Cependant des peuplements bien portants malgré leur état de compétition très intense ont été observés.

Pour le massif des Ouled-Yaâgoub, la majorité des peuplements échantillonnés bénéficient d'un espace vital largement suffisant.

Quant à l'écorçage qui affecte une grande partie des arbres dans les deux massifs et particulièrement à Ouled-Yaâgoub, il semble jouer un rôle léthal important.

Parmi les facteurs sylvicoles pris en considération dans cette étude, on retient que l'âge des peuplements est le facteur prédisposant le plus prépondérant dans l'explication de la mortalité observée dans les deux massifs. Tandis que la compétition entre individus n'a d'effet que sur les arbres vulnérables par leur âge avancé.

Devant des contraintes climatiques de sécheresse de plus en plus intense qui échappent à la maîtrise de l'homme, l'accent doit être mis sur une sylviculture raisonnée adaptée aux conditions stationnelles. Cela nécessite une bonne connaissance de l'âge de vulnérabilité et des normes d'espace vital des arbres.

# Références bibliographiques

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ababneh L.N (2006). Analysis of radial growth patterns of strip-bark and whole bark bristlecone pine trees in the White Mountains of California: implication in paleoclimatology and archaeology of the great basin. Thèse Ph.D, University of Arizona, 147 p.
- Abdessemed K. (1981). *Le cèdre de l'Atlas (Cedrus atlantica Man.) dans les massifs de l'Aurès et du Belezma. Etude phytosociologique. Problèmes de conservation d'aménagement.* Thèse de docteur ingénieur, Université de Droit d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille (France), 201 p.
- Abdessemed K. (1984). Les problèmes de la dégradation des formations végétales dans l'Aurès (Algérie). Première partie: La dégradation, ses origines et ses conséquences. *Forêt Méditerranéenne*, t. VI, n°1: 19-26.
- Allen C.D, Macalady A.K, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M *et al.* (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and management*, 259: 660-684.
- Beghami R. (2010). *Contribution à l'étude des insectes associés au dépérissement du cèdre de l'Atlas (Cedrus atlantica) dans la région des Aurès: cas de la cédraie de Chélia.* Thèse de magister, Université de Batna (Algérie), 132 p.
- Beloula S. (2010). *Etude sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas ans le parc national de Belezma (Wilaya de Batna). Apport de la télédétection et SIG.* Thèse de magister, Université de Batna (Algérie), 60 p.
- Bentouati A. (2008). La situation du cèdre de l'Atlas dans les Aurès (Algérie). *Forêt Méditerranéenne*, XXIX (2): 203-208.
- Bentouati A., Bariteau M. (2006). Réflexions sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas des Aurès (Algérie). *Forêt Méditerranéenne*, XXVII (2): 317-322.
- Biondi F., Waikul K. (2004). Dendroclim 2002: a C+ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers and Geosciences*, 30: 303-311.
- B.N.E.D.E.R (2010). Etude et expertise sur le dépérissement de la cédraie d'Ouled-Yaâgoub et Chelia wilaya de Khenchela. Phase I: Etude du milieu. Alger, 48 p.
- Boudy P. (1952). *Guide du forestier en Afrique du Nord.* Paris: La maison rustique, 505 p.
- Boudy P. (1955). *Economie forestière Nord-Africaine. Tome 4– Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie.* Paris: Larose, 483 p.
- Bouteldjaoui F., Bessenasse M., Guendouz A. (2012). Etude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone semi-aride (cas de la région de Djelfa). *Nature et Technologie*, 07, 109-116.
- Brifa K.R, Jones P.D (1990). Basic chronology statistics and assessment. In: Cook E.R, Kairiukstis LA, eds. *Methods of dendrochronology.* Dordrecht: Kluwer.
- Camps, G. (1974). *Les civilisations préhistoriques de l'Afrique du Nord et du Sahara.* Ed. Doin, Paris, 373 p.
- Carcaillet C. et Thinon M. (1996). Pedaanthracological contribution to the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): Methodology and preliminary data. *Rev. Palaeobot. Palynol.*, 91: 399-416.

- Chbouki N. (1994). Une synthèse dendroclimatique du cèdre de l'Atlas. *Ann. Rech. For. Maroc*, T (27): 33-59.
- Cook E.R (1985). *A time-series analysis approach to tree-ring standardization*. Ph.D. Dissertation, department of geosciences, university of Arizona (Arizona, USA), 171 p.
- Cook E.R, Brifa K.R (1990). Data analysis. In: Cook ER, Kairiukstis LA, eds. *Methods of dendrochronology*, 104-123, Dordrecht: Kluwer.
- Courbet F. (2012). Le cèdre en France face au changement climatique: bilan et recommandations. INRA, 29 p.
- Couvert M. (1969). Étude de quelques charbons préhistoriques de la grotte Capéletti (Aurès-Algérie). *Libyca*, 13: 213-217.
- Couvert M. (1970). Étude des charbons préhistoriques ; préparation des coupes minces et analyse des structures. Trav. du C.R.A.P.E., Alger, 88 p.
- Couvert M. (1977). Atlas d'anatomie des charbons des foyers préhistoriques. Afrique du Nord tempérée. Mém. du C.R.A.P.E., Alger, 168 p.
- Dagnelie P. (1998). Statistique théorique et appliquée. T1. Statistique descriptive et bases de l'inférence statistique. Eds. De Boeck et Larcier s.a., Paris, Bruxelles, 508 p.
- Dagnelie P. (1998). Statistique théorique et appliquée. T2. Inférence statistique à une et à deux dimensions. Eds. De Boeck et Larcier s.a., Paris, Bruxelles, 550 p.
- De Lartigue R.J.F (1904). Monographie de l'Aurès. Marle Audrino, Paris, 493 p.
- El-Jihad M.D (2003). Les sécheresses saisonnières dans le haut bassin de l'Oum-Er-Rbia (Maroc central): aspects et fréquences. *Secheresse*, 14 (3): 157-167.
- Emberger L. (1930): La végétation de la région méditerranéenne, essai d'une classification des groupements végétaux. *Rev. Gen. Bot.*, 42: 641-662 et 705-721.
- Ettobi M. (2006). *Approche multidimensionnelle des relations « état sanitaire-station-sylviculture » pour l'étude du dépérissement des cédraies (Cedrus atlantica Man.) au Moyen Atlas en vue d'un modèle sylvicole de prévention phytosanitaire*. Thèse doct. ès sciences agronomiques, I.A.V Hassan II, Rabat.
- Filion L., Cloutier C. et Cournoyer L. (2010). Dendroécologie des épidémies de la tenthrède du mélèze (*Pristiphora erichsonii*) dans l'est du Canada. In: Payette S. et Filion L., eds. *La dendroécologie. Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec.
- Fritts H.C (1976). *Tree-rings and climate*. Academic Press, London, 567 p.
- Gärtner E. (1987). La maladie des forêts: un premier bilan. Sylviculture. *Science & vie*, 32: 30-38.
- Greguss P. (1955). — *Identification of living Gymnosperms on the basis of Xylotomy*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 263 p.
- Greguss P. (1959). — *Holz-anatomie der europäischen Laubhölzer und Sträucher*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 330 p.
- Guibal F. (1984). *Contribution dendroclimatologique à la connaissance de la croissance du cèdre de l'Atlas dans les reboisements du SUD-Est de la France*. Thèse doct. 3<sup>ème</sup> cycle. Université d'Aix-Marseille III, 136 p.

- Guiot J. et Nicault A. (2010). Méthodes de dendroclimatologie à l'échelle continentale: fonctions de réponse et fonctions de transfert. In: Payette S. et Filon L., eds. *La dendroécologie. Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec.
- Halimi A. (1980). L'Atlas Blidéen. Climats et étages végétaux. OPU, Alger, 523 p.
- Halitim S (2006). *Contribution à l'étude de la réserve utile en eau des sols de cédraines dans les Aurès: Influence des facteurs édaphiques*. Thèse de magister, Université de Batna (Algérie), 108 p + annexes.
- Hirsch A., Boughani A., Salamani M. (2007). Evolution de la pluviosité annuelle dans quelques stations arides algériennes. *Sécheresse*, 18 (4): 314-320.
- Holmes R.L (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bulletin*, 43: 69-78.
- Husch B., Miller C., Beers T. (1972). Forest mensuration. Second edition. John Wiley & Sons, New York, 410 p.
- Jacquot C. (1955). — *Atlas d'anatomie des bois des Conifères*. Centre technique du bois, Paris, 2 T., 133 p.
- Jacquot C., Trenard Y. et Dirol D. (1973). — *Atlas d'anatomie des bois des Angiospermes (Essences feuillues)*. Centre technique du bois, Paris, 2 T., 175 p.
- Kherchouche D., Kalla M., Gutierrez E., Briki A., Hamchi A. (2013). La sécheresse et le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif du Belezma (Algérie). *SECHERESSE*, 24 (2): 129-137.
- Laffitte R. (1939). *Etude géologique de l'Aurès (Algérie)*. Thèse de doctorat ès-sciences naturelles. Université de Paris (France), 482 p.
- Lamb H.H (1995). *Climate, history and the modern world*. Second edition. London, Routledge, 445 p.
- Lebourgeois F. (2010). Principes et méthodes de la dendrochronologie. ENGREF Nancy.
- Larson P.R (1994). The vascular cambium: Development and structure. Springer-Verlag, Berlin.
- Le Dû R. et Saccardy L. (1948). Étude de quelques charbons préhistoriques de la région de Tébessa. *Rev. Afric.*, 92: 111-119.
- Levasseur V. (2000). *Analyse dendroécologique de l'impact de la tordeuse des bourgeons de l'épinète (*Choristoneura fumiferana*) suivant un gradient latitudinal en zone boréale au Québec*. Mémoire, université du Québec A Chicoutimi, 86 p.
- Marguerie D., Bernard V., Bégin Y., Terral J.F (2010). Dendroanthracologie. In: Payette S. et Filon L., eds. *La dendroécologie. Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec.
- Meko D.M and Graybill D.A (1995). Tree-ring reconstruction of upper Gila river discharge. *Water Resources Bulletin*, 31: 605-616.
- Meko D.M., Touchan R., Anchukaitis K.A (2011). Seacorr: a MATLAB program for identifying the seasonal climate signal in an annual tree-ring time series. *Computers & Geosciences*, 37: 1234-1241.
- Mérian P., Pierrat J.C, Lebourgeois F. (2013). Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climat-growth relationships estimation. *Dendrochronologia*, 31: 58-67.

- Messaoudene M. (1983). *Approche dendroclimatologique et productivité de Quercus afares Willd et Quercus canariensis Pomel dans les massifs forestiers de l'Akfadou et de beni-Ghobri en Algérie*. Thèse Ph. D., université Aix-Marseille III (France), 114 p.
- Messaoudene M., Tessier L. (1997). Relations cerne-climat dans des peuplements de *Quercus afares* Willd et *Quercus canariensis* Pomel en Algérie. *Annals des Sciences Forestières*, 54: 347-358.
- M'hirit O. (1982): *Etude écologique et forestière des cédraies du Rif marocain. Essai sur une approche multidimensionnelle de la phytoécologie et de la productivité du cèdre (Cedrus atlantica Manetti)*. Thèse de doctorat es-sciences, Université de Droit. Econ. et Sci. d'Aix-Marseille, 436 p + annexes.
- M'hirit O. (2008). Etude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas. Rapport de synthèse, 108 p.
- Morin H., Jardon Y. et Simard S. (2010). Détection et reconstitution des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinète (*Choristoneura fumiferana*) à l'aide de la dendrochronologie. In: *La dendroécologie. Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec.
- Nicault A., Bégin Y. et Guiot J. (2010). Standardisation des séries dendrochronologiques. In: Payette S. et Filon L., eds. *La dendroécologie. Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec.
- Payette S., Morneau C., Sirois L., et Despons M. (1989). Recent history of the Northern Québec biomes. *Ecology*, 70: 656-673.
- Pons, A. et Thinon, M., (1987). The role of fire from palaeoecological data. *Ecol. Medit.*, 12 (4): 3-11.
- Rhanem M. (2009). Aridification du climat régional et remontée de la limite inférieure du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) aux confins de la plaine de Midelt (Maroc). *Physio-Géo*, Volume 3: 143-165.
- Rondeux J. (1999). La mesure des arbres et des peuplements forestiers. 2<sup>ème</sup> édition. Les presses agronomiques de Gembloux, Gembloux (Belgique), 521 p.
- Roubet C., (1979). *Économie pastorale préagricole en Algérie orientale: le Néolithique de tradition capsienne*. Exemple l'Aurès. C.N.R.S, Études d'Antiquités Africaines, Paris, 594 p.
- Saint-Laurent J. (1934). In Pallary, P.,- *L'abri Alain, près d'Oran (Algérie)*. Arch. De l'I.P.H., mém, 12: 27-28.
- Schoenenberger A. (1970): Etude du couvert forestier de l'Aurès oriental. Projet Algérie 15, 42 p.
- Schweingruber F.H, (1990). *Anatomie europäischer Hölzer. Anatomy of European Woods*. Eidgenöss. Forschungsanst. f. Wald, Schnee u. Landschaft, Birmensdorf. Verlag Paul Haupt, Bern, Stuttgart, 800 p.
- Seltzer P. (1946). Les climats de l'Algérie. Trav. Inst. Mét. Phys. Glo. Algérie, Hors série.
- Stewart P. (1968): Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique. Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord, Alger, 59 (4): 23-36.
- Stockes M.A, Smiley T.L (1996). *An introduction to tree-ring dating*. Tucson: The University of Arizona Press, 73 p.
- Talbi Y. (2010). *Contribution à l'étude des insectes associés au dépérissement du cèdre de l'Atlas (Cedrus atlantica M.) dans la région de Batna: cas de la cédraie de Belezma*. Thèse de magister, université de Batna (Algérie), 114 p.

- Thinon M. (1992). *L'analyse pédoanthracologique. Aspects méthodologiques et applications*. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences. Université Aix-Marseille III, 317 p.
- Thinon M. (1978). La Pédoanthracologie: une nouvelle méthode d'analyse phytochronologique depuis le néolithique. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 287, série D: 1203-1206.
- Thinon M. (1988). Utilisation de la microscopie épiscopique interférentielle pour l'identification botanique des charbons de bois. *Wood and Archaeology*. Bois et archéologie. First European Conférence, Louvain-la-Neuve, October 2nd-3rd, 1987. *PACT 22 - III.4*: 179-188.
- Thinon M. (1994a). Un système rationnel d'identification des charbons de bois pour la pédoanthracologie et l'archéoanthracologie. *Bull. Soc. Linn. Prov.*, 45: 105-117.
- Thinon M. (1994b). Description codifiée des caractères anatomiques des bois carbonisés des dicotylédones et des gnétales. *Bull. Soc. Linn. Prov.*, 45: 119-164.
- Thinon M. (1994c) — Description codifiée des caractères anatomiques des bois carbonisés des conifères et des ginkgoales. *Bull. Soc. Linn. Prov.*, 45: 165-185.
- Thinon M. et Alifriqui M. (2004.) Dégradation des thuriféraires marocaines: Premières données phytohistoriques pédoanthracologiques. *Naturalia Maroccana*, 2 (1-2): 235-243.
- Till C. (1987). The summary response function of *Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière in Morocco. *Tree-Ring Bulletin*, Vol. 47: 23-34.
- Toth J. (1990). Croissance, sylviculture et production du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) implanté dans une zone naturelle de chêne vert (*Quercus ilex* L.) en région méditerranéenne française. In: actes du Symposium International du cèdre, Antalya, Turquie: 963-973.
- Touchan R., Meko D.M, Hughes M.K (1999a). A 396-Year reconstruction of precipitation in Southern Jordan. *Journal of the American Water Resources Association*, 35 (1): 49-59.
- Touchan R., Hughes M.K (1999b). Dendrochronology in Jordan. *Journal of Arid Environments*, 42: 291-303.
- Touchan R., Garfin G.M, Meko D.M, Funkhouser G., Erkan N., Hughes M.K, Wallin B.S (2003). Preliminary reconstruction of spring precipitation in Southwestern Turkey from tree-ring width. *International Journal of Climatology*, 23: 157-171.
- Touchan R., Xoplaki E., Funkhouser G., Luterbacher J., Hughes M.K, Erkan N., Akkemik U., Stephan J. (2005a). Reconstruction of spring/summer precipitation for the Eastern Mediterranean from tree-ring widths and its connection to large-scale atmospheric circulation. *Climate dynamics*, 25: 75-98.
- Touchan R., Funkhouser G., Hughes M.K, Erkan N. (2005b). Standardized precipitation index reconstructed from Turkish tree-ring widths. *Climatic Change*, 72: 339-353.
- Touchan R., Anchukaitis K.J, Meko D.M, Attalah S., Baisan C., Aloui A. (2008a). Long term context for recent drought in northwestern Africa. *Geophysical research letters* 35 (13): L13705.
- Touchan R., Meko D.M, Aloui A. (2008b). Precipitation reconstruction for Northwestern Tunisia from tree rings. *Journal of arid environments*, 72: 1887-1896.
- Touchan R., Anchukaitis K.J, Meko D.M, Sabir M., Attalah S., Aloui A. (2011). Spatiotemporal drought variability in northwestern Africa over the last nine centuries. *Climate Dynamics*, 37: 237-252.
- Zine El Abidine A. (2003). Le dépérissement des forêts au Maroc: Analyse des causes et stratégie de lutte. *Sécheresse* 14 (4): 209-218.

## Résumé

Dans l'Aurès, le dépérissement du cèdre de l'Atlas a engendré dans certains endroits la disparition de peuplements entiers. La présence de sujets vestiges aux environs du Chelia et reliques de cédraies dans le Sud de l'Aurès atteste que le cèdre, comme l'ensemble de la végétation, n'a pas échappé aussi à l'action de l'homme et des contraintes environnementales. Le morcellement et le confinement du cèdre de l'Atlas dans sa répartition actuelle peut attester aussi que cette espèce occupait des surfaces beaucoup plus importantes dans le passé.

Le travail porte sur trois approches différentes:

La pédoanthracologie, basée sur l'identification des fragments de charbon contenus dans le sol, menée dans six stations, a confirmé la présence des traces de charbon de cèdre dans trois stations dont deux sont totalement asylvatiques actuellement (Dj. Zellatou) au voisinage du Sahara, tandis que la troisième est celle de Ras-Bignoun où le pin d'Alep forme l'une des plus belles stations dans la forêt des Beni-Imloul.

La dendroclimatologie, basée sur les cernes de croissance, a permis de reconstituer l'histoire du climat et a montré un rapprochement entre les périodes de sécheresse et les épisodes de dépérissement signalés dans l'Aurès depuis un peu plus d'un siècle. L'étude a montré aussi que la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle est la plus défavorable en termes de sévérité de sécheresse qui atteint son maximum en 2002 et coïncide avec le dernier épisode de dépérissement.

Quant à l'approche sylvicole, l'accent a été mis sur le phénomène de compétition entre les arbres. Il en résulte que l'âge des peuplements est le principal facteur prédisposant dans la mortalité des arbres dans les deux massifs étudiés. L'état de compétition entre les arbres semble jouer un rôle dans la mortalité des peuplements du Chelia à l'inverse de ceux des Ouled-Yaâgoub où les mutilations de l'écorce jouent un rôle légal important.

**Mots clés:** Cèdre de l'Atlas, *Cedrus atlantica*, dépérissement, Aurès, pédoanthracologie, dendroclimatologie, compétition.

## Abstract

In the Aurès, the dieback of Atlas cedar has led in some areas to the disappearance of entire stands. The presence of cedar trees remnants in the vicinity of the Chelia forest and the Atlas cedar relic forests in the south of the Aurès certify that cedar, as the rest of the vegetation, also did not escape the human action and environmental constraints. Fragmentation and confinement of Atlas cedar in its current distribution range can also attest that this species occupied much larger areas in the past.

In this study we adopted three approaches:

The Pedoanthracology, based on identification of charcoal fragments in the soil, confirmed the presence of cedar charcoal traces in the three study sites, two of which are currently non-forest landscapes in the vicinity of the Sahara (Dj. Zellatou), while in the third, Ras-Bignoun, Aleppo pine constitutes one of the best sites in the Beni-Imloul forest.

The dendroclimatology, based on tree-rings analysis, allowed reconstructing the climate history and showed links between drought events and periods of dieback that occurred in the region in the end of the 19<sup>th</sup> century. The study also showed that the second half of the 20<sup>th</sup> century is the worst in terms of drought severity that peaked in 2002 and coincides with the last episode of the dieback.

The silvicultural approach focused on the competition among trees. The results showed that stand age is the main predisposing factor in the tree mortality. The competition among trees seems to play a secondary role in the mortality of Chelia stands, while in Ouled-Yaâgoub bark stripping plays an important role.

**Key words:** Atlas cedar, *Cedrus atlantica*, dieback, Aurès, pedoanthracology, dendroclimatology, competition.

## ملخص

إن حالة الاضمحلال التي تتعرض لها غابات الأرز في الأوراس التي أدت إلى إتلاف مساحات شاسعة، وجود بقايا من أشجار الأرز في أماكن مجاورة لغابة شيليا وبقايا غابات الأرز في المناطق الجنوبية دليل على أن هذا النوع من الأشجار تعرض أيضا لتأثير العامل البيئي والإنساني معا كباقي النباتات. في هذه الدراسة اتبعنا ثلاث مناهج:

المنهج الأول المستند على بقايا أجزاء الفحم الموجودة في التربة أكد لنا وجود آثار لفحم خشب الأرز في ثلاث محطات من بينها اثنتان تتواجد في جنوب الأوراس خالية تماما من أي نوع من أنواع الأشجار (جبل زلاطو). أما المحطة الثالثة فتتعلق بجبل رأس بقتون التي تشكل حاليا محطة من أجمل المحطات في غابة الصنوبر الحلبي ببني املول.

المنهج الثاني المعتمد على دراسة حلقات نمو الأشجار سمح لنا بإعادة بناء المناخ لمدة 555 سنة وأكد وجود العلاقة بين مراحل الجفاف وظاهرة الاضمحلال التي تعرضت لها الغابات قبل أكثر من قرن كما أظهر أن النصف الثاني من القرن العشرين يعد من أسوأ الفترات منذ 1455 من ناحية شدة الجفاف التي بلغت ذروتها سنة 2002 متزامنة مع حلقة الاضمحلال التي شهدتها مؤخرا غابة الأرز.

من خلال المنهج الثالث تم التركيز على عامل التنافس بين الأشجار وتبين أنه يلعب دورا ثانويا في تهيئة الأشجار لهذه الظاهرة خصوصا في شيليا على عكس ما هو في غابة أولاد يعقوب أين انتزاع قشور الأشجار يبدو عاملا مهما. أما السبب الرئيسي فهو العمر المتقدم للأشجار.

**كلمات البحث:** الأرز الأطلسي، الاضمحلال، الأوراس، بيودانتراكولوجيا، نندروكليماتولوجيا، التنافس.