

**UNIVERSITÉ DE BLIDA 1**  
**Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie**  
Département des Biotechnologies

# **THÈSE DE DOCTORAT**

En Sciences Agronomiques

**EFFET DE LA COMBINAISON DES FACTEURS  
ÉCOLOGIQUES SUR LE CÈDRE DE L'ATLAS  
DANS LE PARC NATIONAL DE CHRÉA**

Par

**Mme Salima LEMITI**

Devant le jury composé de :

A. Guendouz-Benrima	Professeur, U. Blida1	Présidente
F.Z. Kara	Professeur, U. Blida1	Examinatrice
N. Chebouti	Professeur, U. Boumerdes	Examinatrice
F. Bounaceur	Professeur, C.U. Tissemsilt	Examineur
M. Baha	Professeur, ENS Kouba, Alger	Examinatrice
Z.E. Djazouli	Professeur, U. Blida1	Directeur de Thèse

Blida, juillet 2020

## RÉSUMÉ

### EFFET DE LA COMBINAISON DES FACTEURS ÉCOLOGIQUES SUR LE CÈDRE DE L'ATLAS DANS LE PARC NATIONAL DE CHRÉA

Les sols de montagne constituent un biotope majeur dans la préservation des peuplements forestiers, entre autre la cédraie, potentiellement hautement vulnérable aux changements des conditions écologiques. Afin de comprendre les répercussions des changements des conditions écologiques sur la fertilité biologique des sols de montagne, cette thèse s'appuie sur une expérimentation d'effet de versant sur la stabilité écologique de la cédraie. La démarche conceptuelle de cette thèse a été d'étudier les effets des versants et des glissements saisonniers sur (i) la dynamique des communautés pédofauniques et la structuration de leurs réseaux trophiques selon le profil pédologique, (ii) la dynamique des différents composés chimiques et physiologiques du cèdre qui constituent le reflet du métabolisme primaire et secondaire, (iii) les interactions s'établissant entre la performance du cèdre et les communautés établies et (iv) les caractéristiques physico-chimique du sol.

Nos résultats montrent une très forte démarcation pédofaunique en faveur du versant Nord par rapport au versant Sud, avec un nombre important de taxa de la microfaune (nématodes), comparé à la méso et macrofaune. Une très forte dynamique du processus de recrutement d'individus en fonction de l'ouverture de la canopée. Il a aussi été enregistré une suprématie pédofaunique décroissante au fil des horizons pédologiques (H1>H2>H3) au niveau des deux versant (Nord et Sud). Les résultats relatifs à la disponibilité de la pédofaune sont en lien la saisonnalité, où on enregistre une croissance progressive des abondances dès le début de la saison humide et une diminution graduelle dès le début de la saison sèche.

Nos résultats montrent aussi que les adaptations des cascades trophiques installées dépendent fortement du contexte de l'étude. Ils soulignent une abondance de phytosaprophage (*Brachyiulus sp.*) et de prédateur (*Gamasida sp.*) sur sol riche en argile et en limon fin et grossier qui entraînent une meilleure production de phytomasse et une quantité très importante de caroténoïdes. Le même constat est signalé à travers l'installation de la cascade trophique à phytosaprophages (*Oribatidasp.*) et *Collembola sp.* ainsi que les prédateurs (*Phytoseiida sp.* et *Gamasida sp.*), sur sol riche en matière organique et très aéré, durant les saisons humides et sèches. Ces deux scénarios, renforcent les fonctions photosynthétiques du végétal et ainsi ses capacités pour une meilleure séquestration des émissions de carbone, permettant au cèdre de jouer un meilleur rôle dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Ces résultats inédits offrent de nouvelles perspectives de recherche sur l'importance de la prise en compte des conditions environnementales locales, caractéristiques physico-chimiques du sol mais aussi au recrutement des cascades trophiques, pour une compréhension plus fine des patrons de la stabilité écologique des cédraies en forêts de montagne.

**Mots clés :** Cascades trophiques, *Cedrus atlantica*, Composantes chimiques du cèdre, Expression végétative, Pédofaune.

## **ABSTRACT**

### **EFFECT OF THE COMBINATION OF ECOLOGICAL FACTORS ON ATLAS CEDAR IN CHRÉA NATIONAL PARK**

Mountain soils constitute a major biotope in the preservation of forest stands, among others the cedar, potentially highly vulnerable to changes in ecological conditions. In order to understand the effects of ecological conditions changes on biological fertility of mountain soils, this work is based on an experiment with a slope effect on the ecological stability of the cedar forest. The conceptual approach of this thesis was to study the effects of slopes and seasonal landslides on (i) the dynamics of pedofaunal communities and the structuring of their trophic networks according to soil profiles, (ii) the dynamics of different chemical components and physiological characteristics of the cedar which reflect the primary and secondary metabolism, (iii) the interactions established between the performance of the cedar and the established communities and (iv) soil's physico-chemical characteristics.

Our results show a very strong pedofaunal demarcation in favor of the North slope compared to the South slope, with a significant number of microfauna taxa (nematodes), compared to the meso and macrofauna. A very strong dynamic in the recruitment process of individuals according to opened canopy. A decreasing pedofaunal supremacy has also been recorded over the soil horizons (H1 > H2 > H3) for both slopes (North and South). The results relating to the availability of soil fauna are linked to seasonality, where there is a gradual increase in abundance from the start of the wet season and a gradual decrease from the beginning of the dry season.

Our results also show that adaptations of trophic cascades installed depend strongly on the context of the study. They highlight an abundance of phytosaprophagous (*Brachyiulus* sp.) and predator (*Gamasida* sp.) on soil rich in clay and fine and coarse silt which lead to better production of phytomass and a very large amount of carotenoids. The same observation is reported through the installation of the phytosaprophagous trophic cascade (*Oribatidasp.*) and *Collembola* sp. as well as predators (*Phytoseiida* sp. and *Gamasida* sp.), on soil rich with organic matter and very aerated, during the wet and dry seasons. These two scenarios strengthen the plant's photosynthetic functions and thus its capacities for better sequestration of carbon emissions, allowing cedar to play a better role in the fight against global warming.

These unexpected results offer new research perspectives on the importance of taking into account local environmental conditions, physico-chemical characteristics of soil and also in the recruitment of trophic cascades, for a more detailed understanding of the patterns of ecological stability of cedar forests in mountain forests.

**Keywords:** Trophic cascades, *Cedrus atlantica*, Chemical components of cedar, Vegetative expression, Pedofauna.

## ملخص

### تأثير تركيبات العوامل الأيكولوجية على أرز الأطلس في الحضيرة الوطنية للشريعة

تشكل التربة الجبلية محيطاً حيويًا هاماً للحفاظ على المجموعات الغابية، بما في ذلك غابة الأرز، والتي يحتمل أن تكون شديدة التأثر بتغيرات العوامل الأيكولوجية. من أجل فهم تداعيات تغيرات العوامل الأيكولوجية على الخصوبة البيولوجية للتربة الجبلية، يستند عملنا هذا على تجربة تأثير المنحدر على الاستقرار الأيكولوجي لغابة الأرز. اعتمد المنهج الفهمي لهذه الأطروحة على دراسة آثار المنحدرات والانزلاقات الموسمية على (1) ديناميكية مجموعات الأحياء الترابية وهيكلتها الغذائية وفقاً لأفاق التربة، (2) ديناميكية المركبات الكيميائية المختلفة والخصائص الفيزيولوجية للأرز التي تعكس التمثيل الغذائي الأساسي والثانوي، (3) التفاعلات القائمة بين أداء الأرز والمجموعات القائمة و (4) الخصائص الفيزيو-كيميائية للتربة.

تُظهر نتائجنا ترسيماً قوياً للغابة للأحياء الترابية لصالح المنحدر الشمالي مقارنة بالمنحدر الجنوبي، مع وجود عدد كبير من أصناف الأحياء الترابية الدقيقة (nematodes) مقارنة بالأحياء الترابية المتوسطة والكبيرة. ديناميكية قوية جداً في عملية تجنيد الأحياء الترابية وفقاً لفتح المظلة الغابية. كما تم تسجيل تفوق كبير للأحياء الترابية من أعلى إلى أسفل آفاق التربة ( $H3 < H2 < H1$ ) على مستوى المنحدرين (الشمالي والجنوبي). ترتبط كذلك النتائج المتعلقة بتوافر الأحياء الترابية بالمؤشر الموسمي، حيث توجد زيادة تدريجية في وفرة الأحياء الترابية من بداية الموسم الرطب وانخفاض تدريجي من بداية موسم الجفاف.

تظهر نتائجنا أيضاً أن تكيفات الشلالات الغذائية التي تم تركيبها تعتمد بشدة على سياق الدراسة. يلاحظ وفرة من phytosaprophage (*Brachyulus sp.*) والمفترس (*Gamasida sp.*) على التربة الغنية بالطين والطمي الناعم والخشن مما يؤدي إلى إنتاج أفضل للكثافة النباتية وكمية كبيرة جداً من الكاروتينات. نفس الملاحظة من خلال تركيب شلال غذائي مكون من phytosaprophages (*Oribatida sp.* و *Collembola sp.*) وكذلك المفترس (*Phytoseiida sp.* و *Gamasida sp.*)، على التربة الغنية بالمواد العضوية ومحواة للغاية، خلال المواسم الرطبة والجافة. يعمل هذان الفرضيتان على تعزيز وظائف التركيب الضوئي للنبات وبالتالي قدرته على تخفيف أفضل لانبعاثات الكربون، مما يسمح للأرز بلعب دور أحسن في مكافحة الاحتباس الحراري.

تسمح هذه النتائج الغير مسبوقه باستطلاعات بحثية جديدة حول أهمية مراعاة العوامل الأيكولوجية المحلية، والخصائص الفيزيو-كيميائية للتربة وكذلك لتجنيد الشلالات الغذائية، من أجل فهم أكثر تفصيلاً لأنماط الاستقرار الأيكولوجي لغابات الأرز في الغابات جبلية.

**المفاتيح:** شلالات غذائية، أرز الأطلسي، المكونات الكيميائية للأرز، تعبير نباتي، الأحياء الترابية.

## **REMERCIEMENTS**

Au terme du présent travail, je souhaiterais présenter mes plus sincères remerciements à :

- M. Djazouli Z., Professeur au département de biotechnologies, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Saad Dahleb (Blida1), pour avoir accepté d'être mon Directeur de Thèse, pour ses orientations, ses conseils, son continuel appui et l'excellente qualité de son encadrement, permettant l'atteinte des objectifs fixés.
- Mme Guendouz-Benrima A., Professeur au département de biotechnologies, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université de Blida1, pour l'honneur qu'elle nous fait en acceptant de présider le jury ainsi que pour son continuel soutien et appui.
- Mme Kara F.Z., professeur à l'université de Blida1, Mme Chebouti N., professeur à l'Université de Boumerdes, M. Bounaceur F., professeur au Centre Universitaire de Tissemsilt et Mme Baha M., professeur à l'ENS de Kouba pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant d'examiner le présent travail.
- Mme Nebih D., maître de conférences au département de biotechnologies, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'université de Blida1, pour tout le soutien, les conseils surtout sur l'identification des nématodes.
- Mme Chaouia C., maître de conférences à l'université de Blida1, pour tout le soutien, les conseils et l'amabilité qu'elle nous a témoigné.
- Feux Messieurs Ghezali D., Haroun F. et Hamouche pour les soutiens qu'ils nous ont apportés pour la réalisation de ce travail jusqu'à ce qu'ils soient rappelés par Dieu le tout puissant, qu'il les accueille dans son vaste Paradis.
- M. Benkheira A., Directeur Central au niveau de la Direction Générale des Forêts pour les orientations et conseils techniques et scientifiques qu'il a bien voulu apporter du début du travail que nous avons réalisé.
- Mme Takarli F. ainsi que toute l'équipe du Parc National de Chréa pour l'accompagnement et les conseils sur le terrain.
- M. Petit de l'Université de Toulouse (France) pour ses conseils scientifiques.

- Mme Djemai Yamina, responsable du laboratoire de zoologie du département de biotechnologies, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Blida1, pour son permanent soutien.
- M. Saïd, responsable du laboratoire de pédologie du département de biotechnologies, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Blida1, pour ses conseils et orientations techniques et scientifiques pour les analyses du sol.
- Le responsable du laboratoire de phytopharmacie du département de biotechnologies, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Blida1, pour nous avoir permis d'effectuer diverses observations et analyses phytochimiques.
- Le responsable du laboratoire de virologie du département de biotechnologies, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Blida1, pour l'appui technique quant aux analyses des nématodes.
- Les ingénieurs de laboratoire, Mme Djamila, Mme Nadjia, Mme Rachida et Mme Hayet, du département de biotechnologies, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Blida1, pour leurs soutiens techniques et matériels.
- Mme Aït Ouarab de l'Institut Technique d'Arboriculture Fruitière (Station de Boufarik) pour ses conseils.
- L'équipe du laboratoire de pédologie de l'Ecole Nationale d'Hydraulique de Blida pour leurs orientations et conseils.

## **DÉDICACE**

*A*

*Mes parents et ma belle mère,*

*Mon mari et mes filles Kawther, Sarah & Malak,*

*Mes frères et sœurs,*

*Toute personne m'ayant aidé pour aboutir à ce résultat.*

## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ

ABSTRACT

ملخص

REMERCIEMENTS

DÉDICACE

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET DES TABLEAUX

<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>CHAPITRE 1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	5
1.1.    Le Cèdre de l'Atlas ( <i>Cedrus atlantica</i> Manetti)	5
1.1.1. Généralités sur le Cèdre de l'Atlas	5
1.1.2. Taxonomie du Cèdre de l'Atlas	6
1.1.3. Caractéristiques du Cèdre de l'Atlas	7
1.1.4. Capacités de régénération du Cèdre de l'Atlas	10
1.1.5. Aires de répartition géographique du Cèdre de l'Atlas	10
1.1.6. Exigences du Cèdre de l'Atlas	12
1.1.7. Services écosystémiques du Cèdre de l'Atlas	15
1.2.    Les facteurs écologiques et leurs effets	16
1.2.1. Facteurs abiotiques	16
1.2.2. Facteurs biotiques	19
1.2.3. Facteurs de dégradation	23
<b>CHAPITRE 2. MATERIEL ET METHODES</b> .....	29
2.1.    Présentation de la région d'étude «Atlas Blidéen »	29
2.1.1. Localisation	29
2.1.2. Impact climatique sur la région d'étude	30
2.1.3. Caractéristiques climatiques	31
2.1.4. Synthèse climatique	32
2.2.    Zone d'étude	35
2.3.    Sites d'échantillonnage	36
2.4.    Étude des réseaux trophiques pédofauniques	38
2.4.1. Techniques d'échantillonnage	38
2.4.2. Préparation, identification et dénombrement de la pédofaune	40
2.4.3. Analyses écologiques des données	42



2.5.	Étude des caractéristiques physico-chimiques du sol sous cédraie	43
2.5.1.	Évaluation de la granulométrie	43
2.5.2.	Évaluation du potentiel d'hydrogène (pH)	44
2.5.3.	Évaluation de la matière organique (MO)	44
2.6.	Étude de l'expression végétative et de l'activité physiologique du cèdre	44
2.6.1.	Techniques d'échantillonnage	44
2.6.2.	Évaluation de l'expression végétative	45
2.6.3.	Evaluation de l'expression photosynthétique	45
2.6.4.	Evaluation de l'activité phytochimique	46
2.7.	Analyses statistiques des données	49
<b>CHAPITRE 3. RESULTATS.....</b>		<b>50</b>
3.1.	Effet du versant du Parc National de Chrèa sur la fertilité biologique du sol forestier sous Cèdre	50
3.1.1.	Estimation de la richesse spécifique	50
3.1.2.	Inventaire de la pédofaune rencontrée sous Cèdre de l'Atlas	51
3.1.3.	Effet de la canopée et des profils pédologiques sur la disponibilité de la pédofaune	53
3.1.4.	Variation temporelle de la disponibilité de la pédofaune	57
3.1.5.	Structuration des peuplements pédofauniques	60
3.1.6.	Statut écologique des peuplements pédofauniques	62
3.2.	Structuration des cascades trophiques	66
3.2.1.	Structure des cascades trophiques des peuplements de nématodes	66
3.2.2.	Structure des cascades trophiques des peuplements de méso et macrofaune	67
3.2.3.	Analyse des assemblages trophiques	70
3.3.	Les relations entre la fertilité biologique du sol et l'expression végétative et phytochimique du cèdre de l'atlas.	74
3.3.1.	Variation quantitative de la granulométrie du sol sous cédraie selon les versants	74
3.3.2.	Variation quantitative de la chimie du sol sous cédraie selon les saisons et les versants	75
3.3.3.	Variation quantitative de l'expression végétative et de la phytochimie du cèdre selon les saisons et les versants	77
3.3.4.	Interactions des paramètres biotiques et abiotiques sous cédraie	80

<b>CHAPITRE 4. DISCUSSION.....</b>	<b>84</b>
4.1.        Importance des interactions pédofaune – facteurs du biotope de la cédraie	85
4.1.1.  Importance de la disponibilité de la pédofaune par rapport à l'exposition	85
4.1.2.  Importance de la disponibilité de la pédofaune sous et hors canopée	86
4.1.3.  Importance de la richesse et de migration de la pédofaune inter-horizons	88
4.1.4.  Importance de la disponibilité des taxons durant la saison humide par rapport à la saison sèche	90
4.2.        Impact des cascades trophiques sur le développement du cèdre	91
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>97</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>101</b>

## **LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX**

Figure 1.1	Présentation des feuilles (touffes d'aiguilles) (a) et des fruits (cônes) (b) du Cèdre de l'Atlas	7
Figure 1.2	Illustration du port (a) et de l'écorce (b) du Cèdre de l'Atlas	8
Figure 1.3	Aire naturelle de répartition géographique du Cèdre de l'Atlas en Afrique du Nord	11
Figure 1.4	Spirale du dépérissement	27
Figure 2.1	Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен durant la période (2000-2014)	33
Figure 2.2	Localisation de la région de Chréa sur le Climagramme d'Emberger	34
Figure 2.3	Présentation de la zone d'étude	35
Figure 2.4	Présentation du site de l'étude	37
Figure 2.5	Carte de la localisation de la cédraie dans le PNC	38
Figure 2.6	Présentation des zones des prélèvements	39
Figure 2.7	Présentation des horizons pédologiques	40
Figure 2.8	Diagramme Fréquences–Abondances	43
Figure 2.9	Rameau de cèdre avec touffes d'aiguilles	45
Figure 3.1	Curve de raréfaction	51
Figure 3.2	Etude comparée des taxons de nématodes selon l'ouverture de la canopée et des profils pédologiques	54
Figure 3.3	Etude comparée des taxons de la méso et la macrofaune selon l'ouverture de la canopée et des profils pédologiques	56
Figure 3.4	Profil annuel des nématodes sous Cèdre de l'Atlas	58
Figure 3.5	Disponibilité comparée des peuplements de nématodes selon la saison, l'ouverture de la canopée et du versant	58
Figure 3.6	Profil annuel de la méso et la macrofaune sous Cèdre de l'Atlas	59
Figure 3.7	Disponibilité comparée des peuplements de la méso et la macrofaune selon la saison, l'ouverture de la canopée et du versant	60
Figure 3.8	Structure des peuplements de nématodes selon l'ouverture de la canopée et du versant	64
Figure 3.9	Diagrammes rang-fréquence des communautés de nématodes de cédraie	67
Figure 3.10	Diagrammes rang-fréquence des communautés de la méso et la macrofaune de cédraie	69
Figure 3.11	Analyse C.H.A. des communautés saisonnières pédofaune sous cédraie (Versant Nord)	71
Figure 3.12	Analyse par DCA des communautés saisonnières pédofaune sous cédraie (Versant Nord)	72
Figure 3.13	Analyse C.H.A. des communautés saisonnières pédofaune sous cédraie (Versant Sud)	73
Figure 3.14	Analyse par DCA des communautés saisonnières pédofaune sous cédraie (Versant Sud)	73

Figure 3.15	Evaluation quantitative du taux d'argile en fonction des versants	74
Figure 3.16	Evaluation quantitative du taux de limon en fonction des versants	75
Figure 3.17	Evaluation quantitative du taux de sable en fonction des versants	75
Figure 3.18	Analyse des variations du pH en fonction des versants et des saisons	76
Figure 3.19	Evaluation quantitative du pH en fonction des versants et des saisons	76
Figure 3.20	Analyse des variations de la matière organique en fonction des versants et des saisons	77
Figure 3.21	Evaluation quantitative de la matière organique en fonction des versants et des saisons	77
Figure 3.22	Projection des paramètres biotiques et abiotiques de la cédraie sur le cercle de corrélation	81
Figure 3.23	Projection des paramètres biotiques et abiotiques de la cédraie sur les deux axes de l'ACP	82
Tableau 1.1	Effets des différents types d'interactions entre 2 organismes A et B.	19
Tableau 2.1	Moyenne des températures et précipitations au niveau du PNC (2000- 2014)	31
Tableau 3.1	Nématodes de la cédraie du Parc National de Chréa	52
Tableau 3.2	Méso et macrofaune de la cédraie du Parc National de Chréa	52
Tableau 3.3	Disponibilité comparée des nématodes (Probabilité associée/ Moyennes arithmétiques)	55
Tableau 3.4	Disponibilité comparée de la méso et la macrofaune (Probabilité associée/Moyennes arithmétiques)	57
Tableau 3.5	Indices de structure des peuplements de nématodes	60
Tableau 3.6	Indices de structure des peuplements de méso et de macrofaune	61
Tableau 3.7	Indices de structure et statut écologique des peuplements de nématodes	62
Tableau 3.8	Indices de structure et statut écologique des peuplements de méso et macrofaune	65
Tableau 3.9	Comparaison des pentes des peuplements des nématodes	66
Tableau 3.10	Comparaison des pentes des peuplements de méso et macrofaune	68
Tableau 3.11	Analyse de l'expression de la production de la phytomasse et de l'activité phytochimique du cèdre de l'Atlas sous l'effet des saisons et des versants	79

## INTRODUCTION

Les forêts sont des écosystèmes d'une grande richesse spécifique, présentes sous des conditions climatiques, géographiques et écologiques variées. L'impact sur les ressources terrestres de ces écosystèmes a augmenté d'une manière exponentielle. L'accélération dans le rythme d'exploitation des ressources naturelles a menacé la couverture végétale dans plusieurs biomes terrestres autour du monde. La prise de conscience croissante de cette dégradation dans les esprits des publics a poussé les gouvernements à adopter des politiques de conservation des patrimoines naturels et de préservation et d'exploitation raisonnables des ressources non renouvelables.

Le Parc National de Chréa a été créé comme une réponse aux dégradations constatées sur les monts de l'Atlas Blidéen, afin de réduire les pertes de la biodiversité dans les forêts qu'il héberge. Il a pour mission, comme toute aire protégée dans le monde, la protection de la vie sauvage, la préservation et la maintenance des services environnementaux et la protection de ses spécificités naturelles et culturelles. Quatrième plus grand parc national en Algérie, reconnu réserve de la Biosphère par l'UNESCO en 2002, il compte parmi les régions les plus riches en matière de biodiversité avec des formations forestières à Cèdre de l'Atlas (1200 ha), une essence noble des hautes montagnes de l'Algérie [1]. Le Parc National de Chréa continue de subir toutes sortes d'agressions (cultures, pâturages, incendies de forêts, pressions touristiques et de détente, etc.).

Le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) est une espèce de conifères endémiques de l'Afrique du Nord. Il couvre les sommets des hautes montagnes de l'Algérie (27 000 ha) et du Maroc (130.000 ha) [2 ; 3]. C'est l'une des espèces de conifères les plus importantes de la région méditerranéenne, qui suscite un très grand intérêt en raison de ses nombreuses caractéristiques. Sa rusticité et sa qualité du bois [4 ; 5] et une faible sensibilité au feu et une valeur esthétique remarquable [6 ; 7]. Cette importante essence connaît une situation sanitaire alarmante, à cause de la combinaison de facteurs biotiques et abiotiques défavorables qui semblent faire, aujourd'hui, consensus comme origine de

déclenchement des phénomènes de dégradation et de dépérissement du Cèdre de l'Atlas et de son habitat naturel. Parmi les facteurs biotiques, les déflorateurs, les ravageurs piqueurs-suceurs et les insectes xylophages qui interviennent très souvent en dernière phase accélèrent le processus de son dépérissement entraînant, dans la majorité des cas, la mort des arbres [8]. De plus, plusieurs forêts de cèdres indigènes sont actuellement en déclin à cause de la sécheresse et du changement climatique [9 ; 10 et 11].

L'un des compartiments les plus importants, indicateur par excellence de la richesse biologique des écosystèmes forestiers, c'est le sol. Il est responsable de nombreuses fonctions naturelles, en interaction directe avec les autres compartiments de l'écosphère, de la faune et de la flore qui y habite et prospère. Il est à la fois un support pour les êtres vivants, un réservoir de matières organiques et minérales, un régulateur des échanges et des flux dans l'écosystème, un lieu de transformation de la matière organique, et un système épurateur de substances toxiques [12]. En plus des racines des plantes et de la microflore, le sol abrite de nombreux représentants de la faune. Appelée pédofaune, cette communauté rassemble les organismes présents de manière permanente ou temporaire dans le sol, à sa surface, ou dans les annexes (bois mort, sous les pierres,...). Elle est représentée par de nombreux taxons comprenant eux même des centaines voire des milliers d'espèces [13].

Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés à la richesse de la diversité faunistique et floristique des forêts, dans l'Atlas Blidéen au niveau du Parc National de Chréa [14 ; 15 ; 16 et 17], dans la cédraie de Belazma [18], à la faune édaphiques dans le fonctionnement du sol [19 ; 20 ; 21 et 22], ainsi que l'effet de la modification structurelle sur le fonctionnement des écosystèmes, tels que la productivité ou le recyclage de la matière organique [23 ; 24 ; 25 ; 26 ; 27 et 28].

L'écosystème forestier, la cédraie, le cèdre, leur habitat et la richesse biologique qu'ils hébergent ou abritent interagissent à travers des phénomènes divers et variés à la recherche d'un équilibre écologique profitable à l'ensemble des êtres vivants et leurs milieu.

Bien que la littérature scientifique, en ce qui concerne le Cèdre de l'Atlas, traite de divers domaines d'intérêts pour son développement, sa protection, sa productivité..., elle reste très faible quand il s'agit de comprendre certaines relations et effets exogènes comme endogènes. Nous avons noté, en initiant le présent travail de recherche, que certaines connaissances quant aux interactions entre les paramètres contextuels, écologiques et pédofauniques des cédraies restent mal connues.

Nous connaissons l'importance de divers effets sur les écosystèmes forestiers, des généralités ont bien été indiquées dans différentes recherches quand il s'agit du Cèdre de l'Atlas au niveau du Parc National de Chréa, mais nous n'avons pas d'éléments techniques et scientifiques détaillés et précis sur les effets des facteurs écologiques sur les cédraies du Parc National de Chréa, notamment liant le cèdre, la faune de son sol et divers paramètres abiotiques d'importance, tels que la saison, la profondeur, les expositions et les zones des prélèvements (canopée et non canopée), dans un contexte de changement climatique de plus en plus avéré.

Nous nous sommes alors fixé, comme principaux objectifs, de contribuer à l'amélioration de la connaissance et de de compréhension de l'importance des interactions entre la faune du sol et les facteurs abiotiques du Cèdre de l'Atlas, notamment l'exposition, le couvert, les strates édaphiques et la saison ; ensemble de paramètres conditionnés par des caractéristiques climatiques en continuel changements d'une part. Et avons, d'autre part, tenté de comprendre l'impact des systèmes trophiques en place sur le développement de cette noble essence forestière, autochtone de l'Afrique du Nord.

Le présent travail s'articule ainsi autour de quatre parties. Un premier chapitre synthétisant la bibliographie spécialisée sur le Cèdre de l'Atlas, ainsi que les paramètres et facteurs contribuant à son équilibre écologique. Le second chapitre est consacré au site d'étude, aux aspects méthodologiques et au matériel utilisé pour réaliser les essais expérimentaux nécessaires et atteindre les objectifs escomptés. Les résultats obtenus ont été analysés dans un troisième chapitre, détaillant qualitativement et quantitativement les différents paramètres obtenus. Cette contribution scientifique est clôturée par une discussion, la plus exhaustive

possible, des résultats obtenus, en essayant au mieux des analogies et comparaisons avec la littérature scientifique existante, la plus rapprochée possible.

Enfin, nous concluons ce travail sur les principales améliorations cognitives en ce qui concerne les effets et interactions, en suggérant des éléments et pistes de recherches nécessitant, à notre humble avis, plus de recherches et d'expérimentations pour la préservation et la promotion du développement du Cèdre de l'Atlas en Algérie et ailleurs.



# CHAPITRE 1

## SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

L'Atlas Blidéen représente l'un des écosystèmes forestiers et montagneux les plus importants du Nord de l'Algérie, offrant des services écosystémiques inestimables et des activités socio-économiques cruciales pour la prospérité et l'équilibre du Parc National de Chréa et son entourage. Il est néanmoins fragile, sensible et vulnérable, et exposé à des effets et influences diversement ressentis, impactant ses fonctions et l'harmonie de son développement. La présente synthèse bibliographique passera en revue la littérature scientifique et technique au sujet des éléments de base sur le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti, 1855) dans sa première partie. Elle proposera, ensuite, un état de connaissances sur les effets des facteurs écologiques sur l'espèce et son biotope. Le but visé par cette synthèse est de comprendre et de disposer des meilleures références et connaissances nous permettant de préparer et de mener au mieux notre travail, tout en offrant à ses futurs utilisateurs l'approche et les informations les plus appropriées dans ce domaine.

### 1.1. Le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti 1855)

#### 1.1.1. Généralités sur le Cèdre de l'Atlas

Le Cèdre de l'Atlas est une essence endémique des montagnes de l'Afrique du Nord (Algérie et Maroc). Il est d'ailleurs considéré par plusieurs auteurs comme l'espèce la plus importante, économiquement et écologiquement, de la montagne méditerranéenne [29 ; 30 et 31]. La configuration de l'aire naturelle de l'espèce et sa variabilité écologique ont favorisé une différenciation de morphotypes divers et d'écotypes adaptés à une gamme étendue de climats et de substrats géologiques [32].

Le genre *Cedrus*, appartenant à la famille des pinacées, est considéré comme étant le plus ancien après le genre *Pinus* [33]. Il recouvre quatre (04) espèces [1; 34 ; 35

et 36], qui occupent des surfaces inégales dans l'étage montagnard de la région méditerranéo-himalayenne. Ces quatre espèces sont :

- *Cedrus atlantica* Manetti 1855: Cèdre de l'Atlas endémique des montagnes Nord africaines (Algérie, Maroc).
- *Cedrus libani* A. Rich. : Cèdre du Liban présent en Asie mineure, au Liban et en Turquie.
- *Cedrus brevifolia* Henry 1908: Cèdre de Chypre, plus confidentielle, ne couvrant que quelques dizaines d'hectares sur l'île de Chypre.
- *Cedrus deodora* G. Don : Cèdre de l'Himalaya est la plus répandue des espèces, peuplant une partie de l'Inde, de l'Afghanistan et du Népal [37].

#### 1.1.2. Taxonomie du Cèdre de l'Atlas

Des points de vue taxonomique, botanique et dendrologique, plusieurs auteurs [38 ; 39 et 40] ont suggéré des descriptions du Cèdre. De manière générale, le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti), répond à la systématique suivante :

<b>Embranchement</b>	Spermaphytes
<b>S/ Embranchement</b>	Gymnospermes
<b>Classe</b>	Vectrices
<b>Ordre</b>	Coniférales
<b>S/ Ordre</b>	Abiétales
<b>Famille</b>	Pinacées
<b>Genre</b>	<i>Cedrus</i>
<b>Espèce</b>	<i>Cedrus atlantica</i> Manetti 1855
<b>Nom français</b>	Cèdre de l'Atlas
<b>Nom berbère</b>	Bignoun. Ithguel
<b>Nom Arabe</b>	El Arz (الأرز)
<b>Nom vernaculaire</b>	Meddad (المداد)

### 1.1.3. Caractéristiques du Cèdre de l'Atlas

#### 1.1.3.1. Les caractères botaniques de l'espèce

Le Cèdre de l'Atlas est par excellence l'essence noble de l'Afrique du Nord, par la majesté de son port et sa longévité qui peut dépasser les milles ans [1].

- Les feuilles : sous forme d'aiguilles persistantes 3-4 ans, aigues, assez rigides, 15 à 20 mm, leur couleur virant du vert clair foncé ou glauque jusqu'au bleu. Sur rameaux longs sont isolées et soudées à l'écorce ; sur rameaux courts, elles se regroupent en rosettes [41] (Fig. 1.1a).
- Les fruits : la maturité des cônes dure deux ans après la floraison, de couleur brune violacée, ils ont 5 à 8 cm de dimension. Ils peuvent atteindre au plus 10 cm [39]. Les grands cèdres, d'âge relativement avancé, portent un grand nombre de cônes porteurs de graines fertiles [42] (Fig. 1.1b).



Figure 1.1 : Présentation des feuilles (touffes d'aiguilles) (a) et des fruits (cônes) (b) du Cèdre de l'Atlas (Orignal, 2016)

- Les racines : Les racines sont très étendues et ramifiées. Elles sont pivotantes ce qui assure une bonne stabilité de l'arbre [43].

- Le port : c'est un arbre de haute taille, dépassant souvent 50 m, et en moyenne 40 m dans les peuplements soit anciens en sol profond, soit serrés [44 ; 41]. Le port de l'arbre est pyramidal avec un fût droit, cime régulière et pointue à flèche courbée quand il est jeune ou d'âge moyen, il prend une forme tabulaire en vieillissant [44] (Fig. 1.2a).
- L'écorce : L'écorce lisse avec une couleur jaune brun à l'état jeune, devient grisâtre en forme crevassée à l'état adulte [45] (Fig. 1.2b).

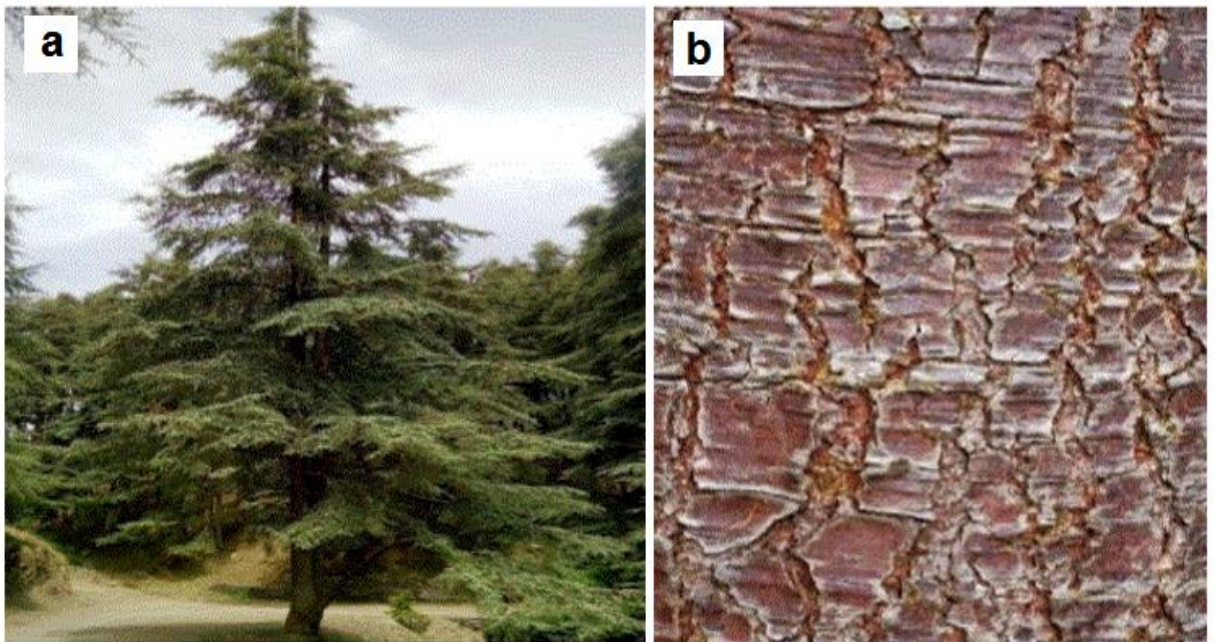


Figure 1.2 : Illustration du port (a) et de l'écorce (b) du Cèdre de l'Atlas (Original, 2016)

- Les branches : elles naissent isolement sur le tronc et portent une multitude de petits rameaux qui se situent tous à hauteur d'un même plan, finissant par donner à l'arbre sa silhouette tabulaire et irrégulière [1 ; 44 ; 30]. Les rameaux ne sont jamais verticillés, ils sont de deux sortes : Les rameaux longs de couleur grise jaunâtre pubescents qui ne poilent d'aiguilles isolées pendant la première année. Les rameaux courts et trapus, insérés sur les précédents et terminés par un bouquet d'aiguilles très nombreuses et très serrées [46].
- Les organes reproducteurs : le cèdre est une espèce monoïque à floraison en automne. Les fleurs mâles sont des chatons cylindriques dressées, jaunes

verdâtres. Les fleurs femelles sont constituées de chatons ovoïdes (cônes) dressés, vert bleuâtre [47].

- Les graines : assez grosses, pointues et longues avec une aile développée sub-triangulaire, de 10 à 15 mm de longueur et de couleur marron roux à marron clair. [48].

#### 1.1.3.2. Les caractères anatomiques du bois

Pour El Azzouzi et Keller [49], le bois du Cèdre de l'Atlas présente diverses caractéristiques qui se résument selon ce qui suit :

- l'anatomie qui permet la caractérisation de chaque espèce forestière et explique la variabilité de certaines propriétés ;

- la vitesse de croissance qui permet de mettre en évidence l'évolution de la production en fonction de la sylviculture et de milieu ;

- la densité qui conditionne plusieurs propriétés physiques et surtout mécaniques du matériau ;

- le retrait qui caractérise les variations dimensionnelles du bois vis-à-vis de l'humidité ambiante (le bois perd de l'eau et se rétrécit) ;

- la couleur et la duraminisation (proportion de duramen) qui qualifient l'aspect esthétique du bois ;

- le taux de résine et d'extraits à l'eau, qui peuvent jouer un rôle dans la variation de certaines propriétés causant parfois des difficultés lors de la transformation du bois.

Selon ces mêmes auteurs, le bois de cèdre se caractérise aussi par des propriétés mécaniques, chimiques, technologiques et autres, comme des propriétés papetières et de durabilité naturelle (utilisation en parquets et sols). Et peut-être

principalement classé en bois d'ébénisterie, de menuiserie, de coffrage et de caisserie.

#### 1.1.4. Capacités de régénération du Cèdre de l'Atlas

La régénération du cèdre est soumise à des contraintes climatiques, déterminées par les exigences de la plante vis-à-vis de l'eau du sol et du froid [50]. La graine de Cèdre ne peut pas germer que si la température maximale journalière avoisine les 10°C pendant 7 à 10 jours [51 ; 52] ; avec une tranche pluviométrique d'au moins 700 à 800 mm, se manifestant par des pluies d'été (pendant la période de croissance) [44]. Mais, si des sécheresses précoces et prolongées surviennent durant cette période, la croissance des jeunes semis peut être atténuée, avec une mortalité probable dans la plupart des cas [53]. La régénération du Cèdre exige un sol meuble et suffisamment profond, pour être capable de retenir l'eau en saison sèche. L'absence d'un tapis herbacé qui peut entrer en concurrence vitale avec les jeunes semis, assure une meilleure régénération du cèdre [44].

Toutefois, les conditions climatiques, notamment la présence ou l'absence d'orages d'été, conditionnent dans une large mesure la réussite des périmètres de régénération du cèdre [54].

#### 1.1.5. Aires de répartition géographique du Cèdre de l'Atlas

Le Cèdre de l'Atlas est une espèce essentiellement montagnarde, elle occupe actuellement des surfaces d'importance inégale qui forment spontanément trois blocs géographiques distincts : l'Afrique du Nord, l'Asie Mineure et l'Himalaya [30].

En Afrique du Nord, et plus particulièrement au Maroc, le Cèdre de l'Atlas occupe deux blocs, le premier dans le Grand Atlas Oriental et Moyen Atlas avec une superficie de 116.000 ha, le second dans le Rif Occidental et Central avec une superficie de 15.000 ha [7].



En Algérie, l'aire de présence du Cèdre de l'Atlas est très morcelée. Elle est répartie en îlots dispersés d'importance inégale. Selon [55] et [56], la cédraie algérienne occupe deux zones climatiques différentes :

- Une zone sèche caractérisée par les conditions climatiques les plus sévères et soumise aux influences sahariennes (Aurès) ;
- Une zone humide qui bénéficie d'un climat particulier favorable localisée plus près de la mer.

C'est ainsi qu'est réparti le Cèdre de l'Atlas entre les chaînes montagneuses de l'Atlas Tellien et de l'Atlas Saharien en Algérie.

Le Cèdre de l'Atlas couvre en Algérie une superficie de l'ordre de 30.400 ha, dont les plus importantes se répartissent comme suit : 17.000 ha sur les Aurès et sur les monts de Hodna (8.000 ha) (Fig. 1.3). Le reste de la cédraie est réparti sur l'Atlas Tellien (Djurdjura : 2.000 ha ; Babors : 1300 ha, Ouarsenis : 1000 ha [1 ; 57]. Il occupe environ 1200 ha sur l'Atlas Blidéen (Parc National de Chréa) [58]. Plus récemment, [59], citent la superficie totale occupée par le Cèdre de l'Atlas en Algérie à environ 33.000 ha.

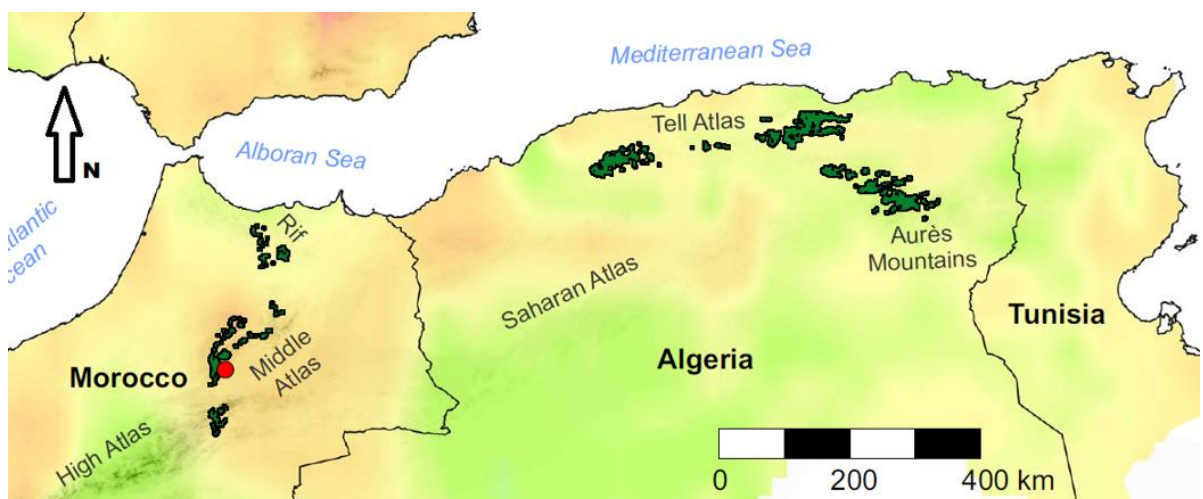


Figure 1.3 : Aire naturelle de répartition géographique du Cèdre de l'Atlas en Afrique du Nord [60]

## 1.1.6. Exigences du Cèdre de l'Atlas

### 1.1.6.1. Les exigences climatiques

Le Cèdre de l'Atlas est une essence qui s'accommode aux différents bioclimats. Il est localisé entre les bioclimats semi-arides, subhumides, humides et per-humide. D'après [44], la zone de préférence du Cèdre de l'Atlas est située en bioclimat humide froid. Cette essence est relativement sciaphile pouvant vivre entre des températures allant de -20°C à +39°C [1] et pouvant résister, sans dommages, à des températures de -25°C (Gausсен, 1967 in [61]). Le Cèdre de l'Atlas a besoin d'une pluviométrie annuelle comprise entre 500 et 1500 mm [62].

En Algérie, les cédraies des Aurès sont à la limite des étages semi-aride et sub-humide [56 ; 1], recevant une tranche pluviométrique modeste variant de 500 à 700 mm/an (Khanfouci, 2005).

Les cédraies du Djurdjura, des Babors, de l'Ouarsenis, de Chréa et d'El Meurdja sont plus humides, recevant d'après Derridj [40] de 1100 à 2100 mm de pluie par an. Le Cèdre de l'Atlas ne se retrouve pas au Maroc en étage semi-aride. En gros, il est estimé que les trois quart des cédraies du Maroc se trouvent dans l'étage humide froid, avec en moyenne 850 à 1200 mm d'eau, ainsi que toutes celles du Rif [1].

### 1.1.6.2. Les exigences édaphiques

L'originalité édaphique du Cèdre de l'Atlas réside dans sa rusticité et son indifférence à la nature lithologique du sol. Le cèdre se rencontre sur des substrats et des sols variés : sur des basaltes, de la dolérite, des marno-calcaires, des marnoschistes, des dolomies, des calcaires dolomitiques, des schistes et des grès au Maroc ; sur des grès blancs, des dolomies, des calcaires francs, des calcaires dolomitiques et des marnes en Algérie [63].



### 1.1.6.3. Autres exigences (altitude, exposition, lumière et enneigement)

Comme toute espèce, le Cèdre de l'Atlas a diverses exigences, toutes aussi importantes les unes que les autres, dont l'altitude, l'exposition, la lumière et l'enneigement, qui se présentent selon ce qui suit.

#### - Altitude :

Dans l'ensemble de son aire naturelle, les cédraies s'observent entre 1500 et 2600 m d'altitude. Selon Benabid [2], cette tranche altitudinale correspond aux étages de végétation suivants :

- Supra méditerranéen qui se situe entre 1400 et 1800 m sur le Rif (Maroc) et les massifs telliens d'Algérie; entre 1600 et 2000 m sur le Moyen Atlas (Maroc) et les Aurès et entre 1700 et 2100 m (Algérie) sur le Haut Atlas oriental marocain ;

- Montagnard méditerranéen qui succède au premier et qui occupe les niveaux altitudinaux compris entre 1800 et 2300 m sur le Rif et les massifs telliens d'Algérie; entre 2000 et 2500 m sur le Moyen Atlas et les Aurès et entre 2100 et 2600 m sur le Haut Atlas Oriental.

D'après Quezel [64], le Cèdre de l'Atlas présente une amplitude altitudinale importante. La forêt de cèdre apparaît, de façon assez schématique à partir de 1500 m sur le Rif, 1600 m sur le Moyen Atlas et 1700 m sur le Haut Atlas Oriental. Il en est sensiblement de même en Algérie, où le cèdre peut toutefois atteindre 1000 et 1100 m dans les talwegs humides des revers septentrionaux des massifs telliens, et monter jusqu'à 2500 m sur les sommets du Djurdjura et de l'Aurès.

En dehors de leur aire naturelle, des cédraies installées en France, au niveau des stations du mont Ventoux, Saumon et Menerbes se comportent idéalement à des altitudes de 300 à 800 m [65].

#### - Exposition

L'exposition joue un rôle très important dans la répartition et dans la vie de la plupart des cédraies. En Algérie, les vents dominants sont de direction Nord-Ouest, ce qui

fait que ces deux versants sont exposés à une pluviométrie plus importante que les versants sud qui sont exposés aux vents chauds et secs (Sirocco) et à un ensoleillement quasi permanent. On rencontre de ce fait les plus belles cédraies sur les versants Nord. Leur limite inférieure est plus basse que celle de l'exposition Sud. Cette dénivellation est due à la variation d'humidité [66].

Au Maroc, la plupart des cédraies sont localisées dans l'étage humide. Elles sont toutes exposées aux vents d'Ouest chargés d'humidité [30].

#### - Lumière

Divers facteurs influencent l'atténuation de la lumière dans les peuplements forestiers particulièrement, la composition, la densité, la structure, l'état du ciel et l'angle solaire. La biomasse foliaire réduit non seulement la qualité de la lumière qui atteint le sous-bois, mais produit de larges modifications de qualité spectrale de la lumière [67].

Dans les peuplements où les couverts qui sont relativement fermés et denses, la présence des semis est rare et le système racinaire reste mal développé et superficiel. L'absence totale d'un couvert végétal favorise la mort prématurée des semis de Cèdre de l'Atlas suite à leur dessèchement par le rayonnement solaire [67].

#### - Enneigement

L'enneigement, qui est la couverture du sol par la neige, constitue un potentiel hydrique important pour le sol et cette importance augmente avec la persistance du couvert neigeux.

D'après Quezel [64], les cédraies supérieures, oro-méditerranéennes, se localisent en bioclimat méditerranéen subhumide, avec une durée d'enneigement fluctuant selon les années, qui varie en fonction de l'altitude et de l'exposition entre 3 et 5 mois en moyenne.

Au Maroc, les forêts de Cèdre du Moyen Atlas Central, à climat méditerranéen subhumide, subissent des périodes d'enneigement sporadiques allant de décembre à avril, sur des épaisseurs de neige de 20 à 60 cm HCEFLCD, 2007 in El Mderssa et *al.* [68].

#### 1.1.7. Services écosystémiques du Cèdre de l'Atlas

Pour Naggar [54], le Cèdre de l'Atlas et les cédraies représentent des enjeux stratégiques sur trois plans : *(i)* en tant qu'espace fonctionnel pour la production de bois, fourrages et d'activités d'écotourisme, de chasse et de pêche, *(ii)* un patrimoine protecteur des sols, des eaux et de la diversité biologique, et *(iii)* un levier de développement régional par les recettes et les emplois qu'ils procurent.

Le Cèdre de l'Atlas a de tous temps constitué une source vitale des populations et assure une activité économique très importante, du fait de ses qualités remarquables : sa longévité, sa résistance à la compression et sa bonne production de bois. Il servait à la construction des toitures, planchers, charpentes [69], voies ferroviaires [1], sans compter les nombreux produits qui sont tirés de son bois : goudron, divers extraits employées en pharmacie et en parfumerie et donne un très joli bois de menuiserie [44]. Il sert à la fabrication de chalets de montagne, de charpentes poteaux, de placage intérieur, de meubles rustiques et des produits d'éclaircie pouvant être utilisés également en papèterie [30]. Il servait également à la fabrication des sarcophages et de cercueils de certains papes [35].

Selon Toth [70], le Cèdre est une essence capable de remplir plusieurs rôles à la fois et ça malgré les conditions écologiques souvent difficiles et la surface restreinte qu'elle occupe.

Le Cèdre de l'Atlas bénéficie d'une grande facilité de régénération naturelle, assurant ainsi la pérennité des peuplements et permettant des reboisements économiques [36]. Mais aussi à la protection contre l'incendie, son feuillage étant relativement ignifuge (peu inflammable) [71 ; 72] avec l'élimination de la végétation herbacée très inflammable et il maintient l'équilibre biologique en protégeant et en améliorant le sol [41].

Le Cèdre de l'Atlas peut être utilisé comme arbre d'ornement dans les parcs et les jardins publics. Son bois noble à texture remarquable est utilisé en ébénisterie et il sert comme bois d'œuvre.

Le cèdre peut également produire une huile essentielle aromatique qui a des propriétés antiseptiques. Les aiguilles sont par ailleurs utilisées comme fourrage pour le bétail durant les périodes d'enneigement [73].

Le contraste des conditions de milieu entre les cédraies algériennes, allant des bioclimats per-humide au semi-aride et de 1400 à 2200 m d'altitude, a façonné une mosaïque de structures forestières. Elles s'imposent dans le paysage par leur architecture, leur beauté et surtout leur port majestueux. Ces atouts ont engendré une diversité paysagère qui, préservée, pourrait jouer un rôle important du point de vue de la politique d'écotourisme, économique et de la conservation de la biodiversité.

## 1.2. Les facteurs écologiques et leurs effets

Un facteur écologique est défini comme étant tout élément du milieu susceptible d'agir directement sur les êtres vivants, au moins durant une partie de leur cycle de développement [12]. Ces facteurs n'agissent jamais seuls, ils sont en étroites interactions. On distinguera ici, les facteurs abiotiques, qui comprennent l'ensemble des caractéristiques physico-chimiques et physiques du milieu et des facteurs biotiques, interactions entre les organismes composant la communauté dans leur biotope.

### 1.2.1. Facteurs abiotiques

#### 1.2.1.1. Facteurs pédologiques

Le sol est un système complexe responsable de nombreuses fonctions naturelles, en interaction directe avec les autres compartiments de l'écosphère. Il est à la fois un support pour les êtres vivants, un réservoir de matières organiques et minérales,

un régulateur des échanges et des flux dans l'écosystème, un lieu de transformation de la matière organique et un système épurateur de substances toxiques [12].

Dans leur étude sur les effets des sols de forêts de cèdres sur les systèmes racinaires secondaires du Cèdre de l'Atlas, El Amrani et Bendriss-Amraoui [74], citant plusieurs travaux de recherches, indiquent que le sol de l'écosystème forestier est hétérogène à la fois dans le temps et dans l'espace, même à petite échelle. Le carbone organique du sol a un effet majeur sur la croissance des plantes et des racines en affectant l'activité microbienne et les propriétés du sol. Il constitue une importante source de N dans les forêts de conifères. Il régule les niveaux de composés organiques azotés primaires et secondaires, la croissance des racines et la ramification selon le stade de croissance et le type de racines impliquées. Dans de nombreuses espèces, les scientifiques ont également montré que la croissance et la morphologie des racines sont corrélées à la disponibilité du phosphore dans le sol. Ils ajoutent que la plasticité de l'architecture racinaire devrait jouer un rôle important dans la réponse des racines aux propriétés du sol. Il est bien connu que la texture du sol affecte la circulation de l'eau, la capacité d'échange ionique, la distribution de la taille des pores et donc la disponibilité de l'eau et la croissance des racines et leur architecture. De plus, l'architecture des racines joue un rôle important dans le maintien des jeunes plants pour assumer la régénération de l'espèce.

#### 1.2.1.2. Facteurs climatiques

Cheddadi et *al.* (2009) in Slimani et *al.* [75] ont signalé que les changements environnementaux en Afrique du Nord depuis la dernière période glaciaire ont eu un impact sur la répartition géographique de *Cedrus atlantica* et sur sa diversité génétique moderne, et il est possible qu'à la fin de ce siècle, elle soit incapable de survivre dans ses emplacements actuels.

Slimani et *al.* [75], ont synthétisé les travaux de plusieurs recherches scientifiques mentionnant les effets climatiques sur le cèdre. Ceux-là, se résument en : (i) Le changement climatique actuel affecte de manière significative les forêts méditerranéennes. Au Nord-Ouest de l'Afrique, les scientifiques ont signalé des épisodes de sécheresse récurrents au cours des dernières décennies, suggérant

que les conditions climatiques limitent davantage la croissance des arbres et la répartition géographique des espèces sensibles à la sécheresse, en particulier pour celles situées en bordure de leur aire de répartition. (ii) Le Cèdre de l'Atlas est un arbre sensible à la sécheresse qui pourrait être affecté par la récente variabilité climatique. Au cours des dernières décennies, des taux de mortalité élevés ont été signalés en Algérie et au Maroc.

En conclusion de leurs travaux de recherche, Slimani et *al.* [75], signalent que les résultats obtenus fournissent des connaissances de base concernant la réponse écologique du Cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique dans sa limite de distribution Sud, où un niveau élevé de mortalité des arbres a été observé au cours des dernières décennies, coïncidant avec la période la plus sèche jamais connue par l'Algérie. Ces informations sont essentielles pour soutenir les efforts de gestion des écosystèmes en cours dans la région.

Les forêts jouent aussi un important rôle « effet-interaction » avec le climat et sa régulation, représentant, avec les océans, le plus important puits de séquestration des émissions de carbone en tant que principal gaz à effet de serre. En illustration de ce qui précède, les travaux effectués par [68] sur la séquestration du carbone par le Cèdre de l'Atlas, montrent que la plus grande allocation de stock de carbone (93%) se trouve dans la tige, suivie des branches (5%) et du feuillage (2%). Le stockage moyen de carbone dans la forêt de cèdres étudiée est de 99,42 tonnes de Carbone/ha (en surface et en sous-sol), soit 364,58 t/ha de CO<sub>2</sub>. Ces mêmes auteurs concluent que la compréhension du bilan et de la dynamique du carbone dans la matière végétale pour une gestion durable des ressources et des fonctions des écosystèmes forestiers nécessite la quantification de la biomasse et du stock de carbone des arbres [76].

Enfin, le 5<sup>ème</sup> rapport d'évaluation du climat établi par le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) conclue que l'écosystème forestier séquestre 9,2 gigatonnes d'émissions nettes de CO<sub>2</sub> par an, soit 33% des émissions mondiales de gaz à effet de serre [77]. Montrant ainsi la place et l'importance du système forestier dans la lutte contre le réchauffement climatique.

### 1.2.2. Facteurs biotiques

Les facteurs biotiques correspondent aux différentes interactions existantes entre les êtres vivants. Elles ont lieu lorsque les individus utilisent les ressources disponibles pour satisfaire leurs besoins vitaux. On distingue plusieurs types d'interactions (Tableau 1.1), ce sont les mêmes qui agissent dans la plupart des écosystèmes. La prédation et la compétition constituent les principales interactions intervenant dans le fonctionnement des communautés.

Tableau 1.1 : Effets des différents types d'interactions entre 2 organismes A et B. [12].

<b>Interactions</b>	<b>Organisme A</b>	<b>Organisme B</b>
Mutualisme	+	+
Neutralisme	0	0
Compétition	-	-
Commensalisme	+	0
Parasitisme	+	-
Prédation	+	-

+ : effet positif, - : effet négatif, 0 : effet nul

Ce sont ces facteurs biotiques qui contribuent le plus à la résistance des sols aux maladies [78].

#### 1.2.2.1. La diversité des organismes du sol

La faune du sol est extrêmement nombreuse. Bien que très variable d'une saison à l'autre ou d'un sol à l'autre, elle est très variée, la plupart de ses représentants sont des animaux microscopiques (quelques dixièmes de millimètres) : des protozoaires (amibes nues, amibes à thèque, flagellés, ciliés), des tardigrades, des rotifères, des nématodes, des acariens. D'autres sont des animaux qu'on attribuera à la

microfaune (moins d'un centimètre) : divers insectes, surtout leurs écophases larvaires (collembolles, diptères, coléoptères, lépidoptères, etc.), des myriapodes, des isopodes, des vers enchytræidés, des pseudo-scorpions, etc. Enfin, un certain nombre d'espèces fera partie de la macrofaune (imago d'insectes, vers de terre lumbricidés, mollusques, arachnides, reptiles, micromammifères rongeurs et insectivores, etc.).

La faune du sol est normalement en équilibre. Toutes les relations, plus aisément observables chez les grosses espèces terrestres ou aquatiques, existent au sein des biocénoses du sol : prédation, parasitisme, symbiose, etc. Chaque espèce occupe une niche qui lui est propre et joue donc un rôle particulier dans les échanges globaux d'énergie et de matière dans le sol.

#### 1.2.2.2. Classification de la faune du sol

En biologie, les niveaux systématiques constituent la classification couramment utilisée. Ils divisent les êtres vivants selon le Règne, l'Embranchement, la Classe, l'Ordre, la Famille, le Genre et l'Espèce. Ce classement est basé sur les caractères génétiques et phénotypiques. Une classification plus fonctionnelle peut être utilisée en liant les organismes à leur milieu et notamment aux ressources qu'il propose (alimentation et habitat). La taille, le régime alimentaire, la position dans le sol, les adaptations morphologiques, les modes de progression, la durée de présence dans le sol constituent d'autres paramètres pour classer la pédofaune [79].

Hedde [80], indique que la grande diversité et la complexité taxonomique des organismes du sol ont conduit les chercheurs à classer la pédofaune en différentes catégories. Depuis l'ancienne classification de Jacot, répartissant les animaux du sol selon leur présence plus ou moins continue dans le sol, différentes classifications ont été utilisées :

##### - Classification morphologique

Appelée aussi classification morphométrique, elle différencie la micro- (< 0,2 mm), la méso- (0,2-2 mm) et la macrofaune (> 2 mm). Cette classification est couramment



utilisée mais soulève, quelques fois, des problèmes de définition des limites entre catégories.

Certains taxons ont en effet des représentants dans plusieurs catégories, et certaines espèces passent également d'une catégorie à l'autre au cours de leur développement (diptères, cloportes). Cette classification est cependant très utile car elle reflète les exigences matérielles d'extraction de la pédofaune qui diffèrent considérablement d'une classe de taille à l'autre. [80]

#### - Classifications éco-morphologiques

Les classifications éco-morphologiques prennent en compte, de façon simultanée, les traits biométriques et écologiques des organismes. Elles ont été notamment développées pour les collemboles (épédaphique, hémi-édaphique ou eu-édaphique) et les vers de terre (épigés, endogés et anéciques). Ces catégories sont souvent considérées comme des groupes fonctionnels. [80]

#### - Classifications trophiques

Les classifications trophiques classent les invertébrés du sol selon leurs préférences trophiques (herbivores, prédateurs, saprophages, parasites, polyphages, mycophages, rhizophages, nécrophages, xylophages,...). Des classifications très poussées ont été établies notamment pour les larves de diptères, les termites, les collemboles ou les acariens. [80]

#### - Classifications fonctionnelles

Les classifications fonctionnelles sont souvent liées à deux objectifs distincts, l'un étant d'étudier l'effet des espèces sur les propriétés de l'écosystème (groupes fonctionnels d'effets) et l'autre s'intéressant à la réponse des espèces aux contraintes et aux perturbations (groupes fonctionnels de réponse).

Parmi les invertébrés du sol, il est aujourd'hui possible de définir trois groupes fonctionnels d'effets : les micro-prédateurs, les transformateurs de litière et les ingénieurs écologiques. Ces trois groupes se définissent principalement par la nature de leurs interactions avec la microflore du sol et leur capacité à créer des bio-structures :

(i) les micro-prédateurs (protozoaires et nématodes), ils ne créent pas de structures spécifiques mais régulent les activités microbiennes par leur prédation ;

(ii) les transformateurs de litière comprennent les invertébrés qui dégradent physiquement les litières et créent des structures purement organiques (pelotes fécales) au sein desquelles les microorganismes trouvent des conditions favorables à leur développement (digestion externe) ;

(iii) les ingénieurs écologiques regroupent les invertébrés qui créent des structures organo-minérales durables, qui interagissent avec les microorganismes directement au niveau de leur tube digestif (digestion interne) et dans les structures qu'ils créent. Ces structures correspondent à des déjections, des galeries, des dômes. [80]

#### 1.2.2.3. Biodiversité et multi-fonctionnalité

Lavorel et *al.* [81], indiquent que les différentes composantes de la biodiversité peuvent contribuer simultanément à plusieurs services. Par exemple, la richesse spécifique végétale est bénéfique pour l'efficacité de la production primaire et par là pour l'utilisation de l'azote et la qualité des eaux, ce qui permet d'optimiser simultanément des deux services au travers de la gestion de la fertilisation. De la même manière, la richesse taxinomique / génétique des mycorhizes favorise la stabilité du sol, l'efficacité de la production primaire (via la nutrition minérale des plantes) et sa stabilité via ses effets sur l'état sanitaire des plantes, et la préserver doit donc permettre des gains de production importants. Lavorel et *al.* [81], déduisent que la multifonctionnalité est une réalité incontournable pour la gestion des services écologiques. Les services les plus communément considérés dans le cadre de la multifonctionnalité sont la production fourragère, la qualité des eaux et la régulation du climat via la séquestration du carbone et la limitation de production des gaz à effet de serre.

L'analyse des rétroactions entre diversité végétale et diversité des organismes du sol, et leurs implications pour les services intrants de ressource illustre également la complexité des inter-relations existant entre services via les interactions entre

diversités de différents organismes. S'intéresser non plus à la diversité taxinomique mais à la diversité fonctionnelle ouvre d'autres perspectives sur les mécanismes sous-tendant la multi-fonctionnalité. Ainsi, la présence de groupes fonctionnels particuliers peut contribuer simultanément à plusieurs services écologiques [81]. Ils conclurent que les différentes composantes de la biodiversité peuvent contribuer simultanément à plusieurs services. Inversement, une même composante de la biodiversité peut intervenir comme source de bénéfices pour certains services, mais de dommages pour d'autres services. S'il semble qu'au niveau spécifique la fourniture de services multiples implique une richesse supérieure à celle nécessaire pour soutenir des services considérés individuellement, il apparaît que la diversité fonctionnelle, et en particulier les traits des espèces les plus abondantes, soit également un facteur déterminant dont les conséquences restent à explorer.

A titre d'exemple, ces mêmes auteurs suggèrent une analyse des inter-relations entre gestion, biodiversité, et multi-fonctionnalité : analyse du cas des services de régulation biologique. Base de toutes les chaînes trophiques hétérotrophes, de l'herbivore au prédateur de 4<sup>e</sup> ou 5<sup>e</sup> niveau, la diversité des plantes a d'importantes conséquences directes et indirectes sur les arthropodes impliqués dans l'aspect phytosanitaire des cultures et dans la pollinisation des espèces entomophiles.

La conclusion tirée par ces même auteurs à ce sujet est que la diversité végétale des écosystèmes détermine la diversité des communautés d'arthropodes impliqués dans les services de régulation biologique (pollinisation, contrôle biologique des ravageurs).

### 1.2.3. Les facteurs de dégradation

#### 1.2.3.1. Les ravageurs du Cèdre de l'Atlas

Plusieurs espèces d'insectes existent dans les cédraies du bassin méditerranéen et causent des dégâts. Les chercheurs de l'INRA signalent des peuplements spontanés de Cèdre de l'Atlas de l'Afrique du Nord ravagés par un riche complexe d'insectes phytophages dont les processionnaires et les scolytes [82].

(i) Les insectes mangeurs des aiguilles (défoliateurs)

-La chenille processionnaire du cèdre (*Thaumetopoea bonjeani* Powell.) ravageurs des aiguilles signalées pour la première fois dans les cédraies du Belezma depuis, sa présence a été confirmée à la suite d'investigation dans les cédraies, [83]. Selon Germain et al. [84], cette chenille compte parmi les parasites les plus courants du cèdre de l'Atlas dans son aire d'origine ;

-La chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiffermüller) qui attaque les aiguilles des jeunes pousses [1]. Elle est largement présente sur cèdre en peuplements mélangés avec le pin [84] ;

-Tordeuse du cèdre (*Epinotia cedricida* Diakonoff) attaque l'arbre en entier indépendamment de son âge et de sa situation dans le massif forestier [85 ; 86]. Selon M'hirit et al. [30], l'*Epinotia* algérienne (*Epinotia algeriensis* Chambon) peut pulluler et constituer un danger, ou aussi vivre dans l'aire du cèdre à l'état de latence sans présenter de risque pour l'arbre.

(ii) Les insectes mangeurs de graines

Le chalcidien est un insecte parasite de la graine du cèdre en particulier durant les années de faible production [6]. Germain et al. [84], indiquent que le chalcidien séminiphage (*Megastigmus pinsapinis* Hoffmeyer) est un ravageur de l'aire d'origine du cèdre.

(iii) Les insectes suceurs de sève

D'après Fabre et al. [87], Le puceron *Cedrobium laportei* Remaudière est un puceron spécifique du genre *Cedrus*. Il a été décrit en 1954 par Remaudière à partir d'individus récoltés à Ben Aknoun, près d'Alger. Il a aussi été retrouvé en Algérie, en Grande et Petite Kabylie, dans les Aurès, dans le Hodna, dans l'Ouarsenis, dans les cédraies de Chréa au sud de Blida et à Baïnem à l'ouest d'Alger (Fabre, missions 1987, 1988, 1989). Le puceron de cèdre produit du miellat qui colle sur les feuilles (aiguilles) et gêne l'assimilation chlorophyllienne [48].

### 1.2.3.2. Les maladies cryptogamiques

Parmi les champignons qui causent des dégâts redoutables sur le cèdre les auteurs citent :

-*Polyporus officinalis* : Cette espèce cause des altérations plus au moins graves au cèdre [44] ;

-*Armillari Amilla* : Ce champignon attaque surtout les racines et le tronc. Il se développe sur les arbres affaiblis [88] ;

-*Fusarium, Pythium, Phytophthora, Botrytis, Cylindro carpon* et *Rhizoctonia* causent la fente des semis [89];

-*Laricifomes officinalis* et *Phellinus chrysoloma* sont des champignons lignivores qui provoquent une pourriture du bois de cèdre [90].

### 1.2.3.3. Les incendies

De toutes les espèces qui composent la forêt méditerranéenne, le cèdre est le moins inflammable et le moins combustible. En peuplement dense, le cèdre élimine toute végétation herbacée, de ce fait il est peu propice au feu [1 ; 43].

D'après Meddour et Derridj [91], la surface incendiée de Cèdre de l'Atlas sur le total des essences forestières en Algérie, pour la période 1985 - 2010, est de l'ordre de 0,1%, montrant ainsi le caractère peu inflammable de cette espèce.

### 1.2.3.4. L'homme

C'est l'homme qui par son action directe (coupe illicites, défrichements...) ou indirecte (parcours...) à contribuer à la régression des formations végétales en général et de la cédraie en particulière. Il reste l'ennemi le plus dangereux du Cèdre de l'Atlas [56 ; 92]. Et aussi par le pâturage de bétail (surtout les bovins) lâché en liberté dans la forêt qui cause de terribles dégâts par leurs empiètements qui compactent le sol [93].

### 1.2.3.5. Le dépérissement des Cédraies

Les auteurs ne s'accordent pas toujours sur les causes du dépérissement. Si certains l'attribuent aux changements climatiques [94; 95 et 96], d'autres le corrélient aux problèmes pathologiques, voire la pullulation d'insectes xylophages et mycologique [97 ; 98] ou bien en l'attribuant à plusieurs hypothèses [9].

D'après les recherches de Boutte [99], trois séries de facteurs sont responsables du dépérissement du cèdre, à savoir :

- Facteurs prédisposant : Ces facteurs, agissent de façon durable et pérenne sur le peuplement, conduisant souvent à une issue fatale.

- Facteurs déclenchant : Ils regroupent des variables qui provoquent des stress de forte intensité mais qui agissent à court terme accidents climatique, pullulations d'insectes (défoliateurs) sécheresse, concentration en sel, pollution, virus.

- Facteurs aggravants : Ils développement de parasites de faiblesse, champignons parasites, insectes xylophage. Mais le dépérissement forestier est généralement apprécié par deux symptômes macroscopiques, la défoliation et le jaunissement du feuillage.

Le « dépérissement forestier » est généralement apprécié par deux symptômes macroscopiques : la défoliation et le jaunissement du feuillage (Landmann et *al.*, 1987 in Beloula [48]). La figure (1.4), illustre la spirale de dépérissement.



Figure 1.4 : Spirale du dépérissement (Lamontagne, 2000 in Beloula [48]).

D'après Bentouati et Bariteau [9], le dépérissement du cèdre est apparu dans les années 1940 au Maroc, et dans les Aurès (Algérie), vers les années 1982. Il s'avère dû principalement à la chenille processionnaire du cèdre *Thaumetopoea bonjeani*.

Les travaux menés par Messaoudene et *al.* [100] et Touchan et *al.* [101], confirment l'hypothèse de l'impact du changement climatique sur le dépérissement et mettent en évidence le problème que rencontre le cèdre pour bien gérer les réserves hydriques du sol au niveau de la région de Bélezma, surtout de 1980 à 2005. Dans cette localité des Aurès, la période de sécheresse, très marquée entre 1996 à 2002 avec une diminution de 22 à 25% du régime des précipitations, aurait provoqué la fragilité des cédraies d'où son dépérissement massif ultérieurement. Becker et Levy [102], Zine El Abidine [94], Demartean [103], Ladjal *et al.* [86] et Niederlender et Badeau [95], indiquent que *Cedrus atlantica* semble avoir un fort potentiel de croissance quand il est soumis à un approvisionnement en eau, mais est très

sensible à la sécheresse du sol et au déficit hydrique. Par ailleurs, l'analyse diachronique et synchronique de la végétation du Bélezma, Megdoud et *al.* [104], révèle un changement qualitatif et quantitatif de la végétation qui affecte la cédraie de basse altitude. Ces changements sont confirmés par le faible index floristique (47%-50%) entre les stations dépérissantes et en bonne santé. Le couvert végétal est marqué par le développement des espèces thermo-xérophiles. Quelques espèces caractéristiques et endémiques ont disparu du cortège floristique. Cette analyse montre une tendance à la substitution du cèdre par le chêne vert. Elle semble confirmer l'hypothèse d'une transition bioclimatique et floristique prédite dans la région méditerranéenne (Messaoudene et *al.*, 2012 in Akli [105]).

Selon Hertman et *al.*, (1991) in Akli [105], les symptômes du dépérissement concernent trois niveaux :

-Symptôme sur aiguilles et feuilles : une chute prématurée (défoliation précoce) éclaircissement, dénudement de rameaux, de parties ou de la totalité de la couronne, décoloration jaunâtre et blanchâtre (chloroses) brunâtres, flétrissement, anomalies de croissance, déformation ;

-Symptômes sur bourgeons, pousses, et rameaux : chute des pousses, décoloration jaunâtre, flétrissement, anomalie de croissance, déformations des rameaux ;

-Symptôme sur tronc et branches : des chutes, une décoloration jaunâtre, flétrissement, anomalie de croissance, déformations, plaies ouvertes ou cicatrisées.



## **CHAPITRE 2**

### **MATÉRIEL ET MÉTHODES**

Nous proposons ici d'étudier les relations s'établissant entre la cédraie fermée, les réseaux trophiques, leurs habitats, et le stock de litière. L'approche retenue consiste en une étude, la même année et au même endroit, de ces deux éléments. La base de données obtenue comporte ainsi, pour chaque station, des variables contextuelles (site et techniques), environnementales (matière organique, expression physiologique) et faunistique (communautés pédofauniques). Les analyses sont effectuées à différentes échelles spatiales, depuis le profil pédologique jusqu'à la station et enfin la forêt.

#### 2.1. Présentation de la région d'étude «Atlas Blidéen »

##### 2.1.1. Localisation

L'Atlas Blidéen, qui s'étend entre 36°30'9" et 36° N et 3°20'9" et 2°40'9" E, forme la partie centrale de l'Atlas tellien (sous-secteur phytogéographique de l'Atlas tellien algérois), abritant le Parc National de Chréa (superficie de 27000 ha). C'est une région montagneuse de plissement alpin, dont l'aspect structural est très accidenté. Sa ligne de crêtes oscille entre 1400 et 1600 m d'altitude, sur une longueur approximative de 8 km, et culmine à 1629 m au massif de Chréa et à 1603 m à celui de Mouzaïa, séparés par les gorges profondes de l'Oued Chiffa, dont le lit se situe entre 450 et 181 m d'altitude.

Son orientation générale WSW-ENE entraîne une dissymétrie tant climatique que phytocénotique, entre les deux versants principaux d'exposition contrastée. Si lithologiquement le massif est homogène, constitué essentiellement de schistes du crétacé inférieur, avec quelques affleurements de calcaires marneux [106], il présente une grande diversité de combinaisons synécologiques sur le plan édaphique et bioclimatique. De plus, l'action anthropique pluriséculaire s'est exercée partout avec une intensité variable. C'est dire la complexité des communautés végétales, des séries de végétation et des paysages végétaux [107].

### 2.1.2. Impact climatique sur la région d'étude

Aliouche [108], indique qu'en Algérie, l'évolution récente du climat montre que le réchauffement est plus important que la moyenne et qu'il se manifeste sous forme d'une sécheresse. En effet, sur les 40 dernières années les températures moyennes annuelles ont subi une augmentation moyenne de l'ordre de +0,5°C, alors que la pluviométrie, sur cette même période, a connu une baisse estimée à environ 10%. Ces conclusions indiquent clairement que des changements climatiques sont entrain d'avoir lieu touchant l'ensemble du pays, mais plus particulièrement les régions du nord, dont l'Atlas Blidéen.

En relation avec la région d'étude et l'espèce considérée, Sarmoum et *al.* [109], confirment que les forêts de Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) de l'Afrique du Nord sont en déclin, après des décennies de pressions anthropiques et de sécheresses répétées. Ils ont cherché à savoir si les récents épisodes de déclin de ces forêts étaient liés aux précipitations et aux changements de température, conduisant à une réduction de la croissance radiale des arbres et des découplages climat-croissance. Ils conclurent que l'analyse des chronologies de largeur des cernes des Cèdres de l'Atlas dans le Nord-Ouest de l'Algérie ont permis d'identifier des changements climatiques et de croissance dans ces forêts méditerranéennes vulnérables. Ces chronologies, construites pour six sites, ont montré des schémas communs de variabilité d'une année à l'autre au cours de la période 1910-2006. La croissance dans les sites exposés au Nord a diminué entre les années 1980 et 2006, tandis que la croissance dans les sites de moyenne altitude a diminué du début du XXe siècle jusqu'aux années 1940, est restée stable jusqu'aux années 1980, puis a diminué jusqu'en 2006.

Ces quelques résultats de travaux montrent clairement l'avènement d'un changement climatique à effets négatifs sur la région de l'Atlas Blidéen ainsi que ses écosystèmes dont la cédraie de Chréa.

### 2.1.3. Caractéristiques climatiques

Le climat est l'ensemble des phénomènes qui caractérisent l'atmosphère, ses fluctuations provoquent d'une année à l'autre des variations qui augmentent ou diminuent les rendements des cultures. Néanmoins, son action s'exerce sur toutes les phases du développement de ces dernières. La température représente un facteur limitant de toute première importance, car elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère [110].

Le climat est l'un des facteurs écologiques clés influant étroitement sur l'équilibre et le maintien de la végétation. Toute étude climatique, et de surcroît bioclimatique, repose sur la disponibilité de données suffisantes, homogènes et fiables. A cause du non fonctionnement des stations météorologiques au niveau du Parc National de Chréa et l'absence de données climatiques, nous nous sommes basés, pour notre expérimentation, sur le travail de Lahrech et Khenafif [111], qui ont procédé à une correction des données climatiques (pluviométrie et température) de la station de Médéa selon la méthode proposée par [112].

D'après Halimi [14], le facteur thermique dans la zone méditerranéenne est moins important que le facteur eau. Cependant, ce paramètre climatique agit directement sur la répartition géographique des espèces. Il convient de noter que, très souvent, ce sont les températures extrêmes plutôt que les moyennes qui jouent un rôle décisif.

Tableau 2.1 : Moyenne des températures et précipitations au niveau du PNC (2000-2014)

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
<b>Moyenne P mm</b>	101,6	90,5	74,0	76,4	65,4	10,9	4,1	6,8	40,4	51,4	115,0	109,5
<b>Moyenne T C°</b>	<b>4,96</b>	5,21	8,32	10,85	15,04	20,94	<b>24,65</b>	24,28	19,41	15,66	9,24	5,82

Source: (ONM 2000-2014) in Lahrech et Khenafif [111]

Les moyennes mensuelles de température (Tableau 2.1) entre 2000-2014 varient de 4,96 C° à 9,24°C pendant la période hivernale, tandis que celles de la période estivale varient entre 20,94°C et 24,65 °C.

La quantité annuelle des précipitations est l'un des paramètres clés dans la caractérisation du climat [113]. Pour Ozenda [114], l'installation de la végétation ne dépend pas seulement du total annuel des précipitations, mais également de la répartition des pluies au cours de l'année. Ainsi, dans les pays méditerranéens, la pluie tombe surtout pendant la période froide, lorsque les peuplements en ont le moins besoin, et fait défaut l'été, au moment où la forte température augmente l'évaporation et la végétation en a le plus besoin.

Dans l'Atlas Blidéen, le régime moyen des quantités de pluies subit l'influence capitale des facteurs orographiques, notamment l'altitude, créant ainsi une forte disparité entre les stations [14]. Le tableau 2.1, ci-dessus, illustre une irrégularité des précipitations tout au long de l'année qui peut influencer la flore et la faune sur place. Ceci est bien indiqué par des précipitations avoisinant les 115 mm pour le mois de novembre comme maximum, alors que le minimum des précipitations est enregistré en été, au cours du mois de juillet, avec seulement 4.1 mm.

#### 2.1.4. Synthèse climatique

Selon Bagnouls et Gaussen [115], le mois sec est défini par la somme des précipitations moyennes exprimée en (mm), est inférieure au double de la température de ce mois ( $P/2T$ ), exprimé par le Diagramme ombrothermique sur lequel sont juxtaposées les précipitations et les températures. Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen révèle la présence de deux saisons contrastées. Une saison froide correspondant à la saison pluvieuse et une saison sèche correspondant à la saison chaude. La saison froide assez longue, débute à la mi-septembre et se prolonge jusqu'à fin mai, alors que la saison sèche s'étale du début juin jusqu'à la mi-septembre pour la période 2000-2014 (Fig. 2.1).

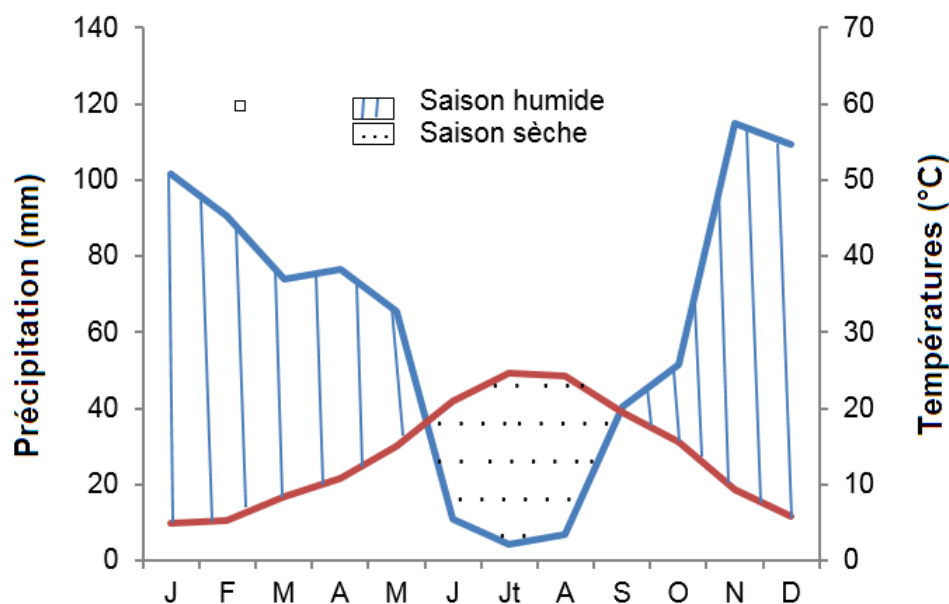


Figure 2.1: Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен durant la période (2000-2014)

Pour identifier le climat de la région de l'Atlas Blidéen, nous avons fait appel au quotient pluviométrique d'Emberger qui se base sur le régime des précipitations et des températures. Le coefficient pluviométrique d'Emberger est calculé selon la formule de Stewart [116].

$$Q_2 = 3,43[P / (M - m)]$$

**P** : Pluviométrie annuelle exprimée en mm.

**M** : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud exprimée en °C.

**m** : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid exprimée en °C.

La température moyenne minimale du mois le plus froid (4,96°C), placée en abscisses et la valeur du coefficient pluviométrique  $Q_2$  placée en ordonnées, donnent la localisation de la station météorologique choisie dans le Climagramme d'Emberger. La valeur de  $Q_2$  calculée à partir d'une synthèse de 15 années est de 129,95, ce qui permet de classer notre zone d'étude dans l'étage bioclimatique subhumide à hiver doux. (Fig. 2.2)

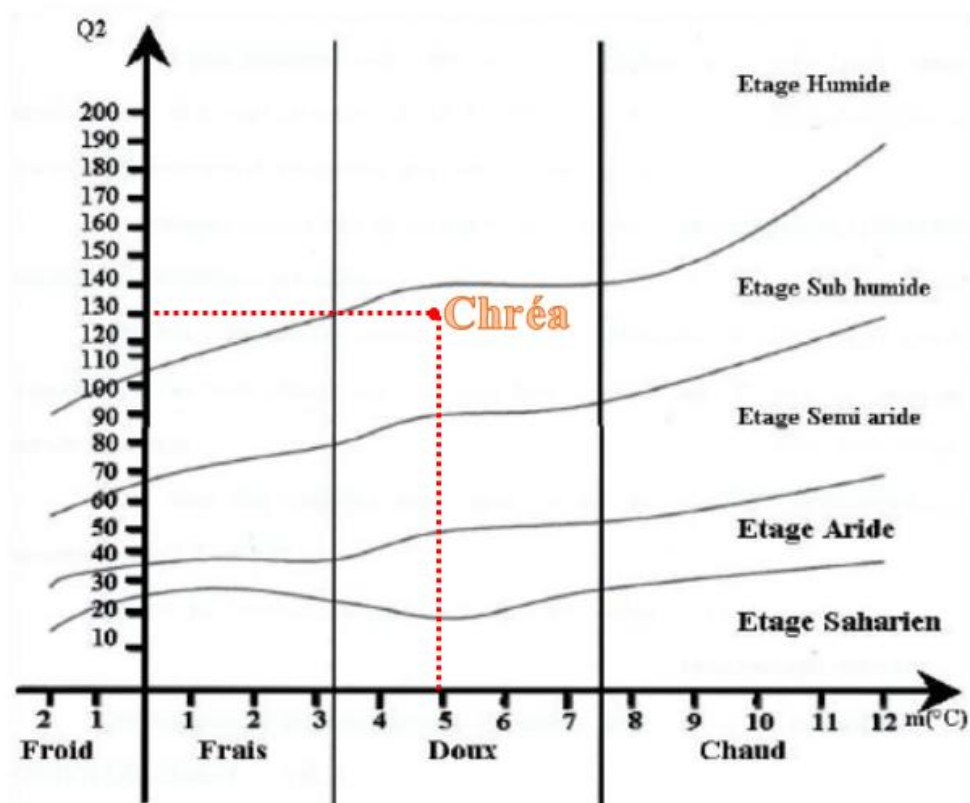


Figure 2.2 : Localisation de la région de Chréa sur le Climagramme d'Emberger

Les résultats des travaux réalisés par Rabhi et *al.* [117], montrent un degré significatif de similitudes par rapport à notre synthèse climatique. Ils signalent que l'allure générale du relief de l'Atlas Blidéen forme une limite entre les influences maritimes du nord et les influences continentales du sud, influençant ainsi le climat régnant dans cette région. Durant la période hivernale, les températures varient de 4,6 à 5°C, et pour la période estivale, les moyennes des températures sont comprises entre 20,5 °C et 24,1 °C.

Les précipitations annuelles varient entre 600 et 800 mm. Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson montre que la période sèche s'étale de la mi-mai à la mi-septembre. La zone d'étude se confine dans le bioclimat subhumide à hiver tempéré.

## 2.2. Zone d'étude

L'étude de l'effet de la combinaison des facteurs écologiques sur le Cèdre de l'Atlas a été menée dans le Parc National de Chréa situé dans la région centrale de l'Algérie ( $36^{\circ}19'-36^{\circ}30'$  N et  $2^{\circ}38'-02'$  E), à environ 40 km au Sud-Ouest d'Alger et au Sud de la ville de Blida (Fig. 2.3).

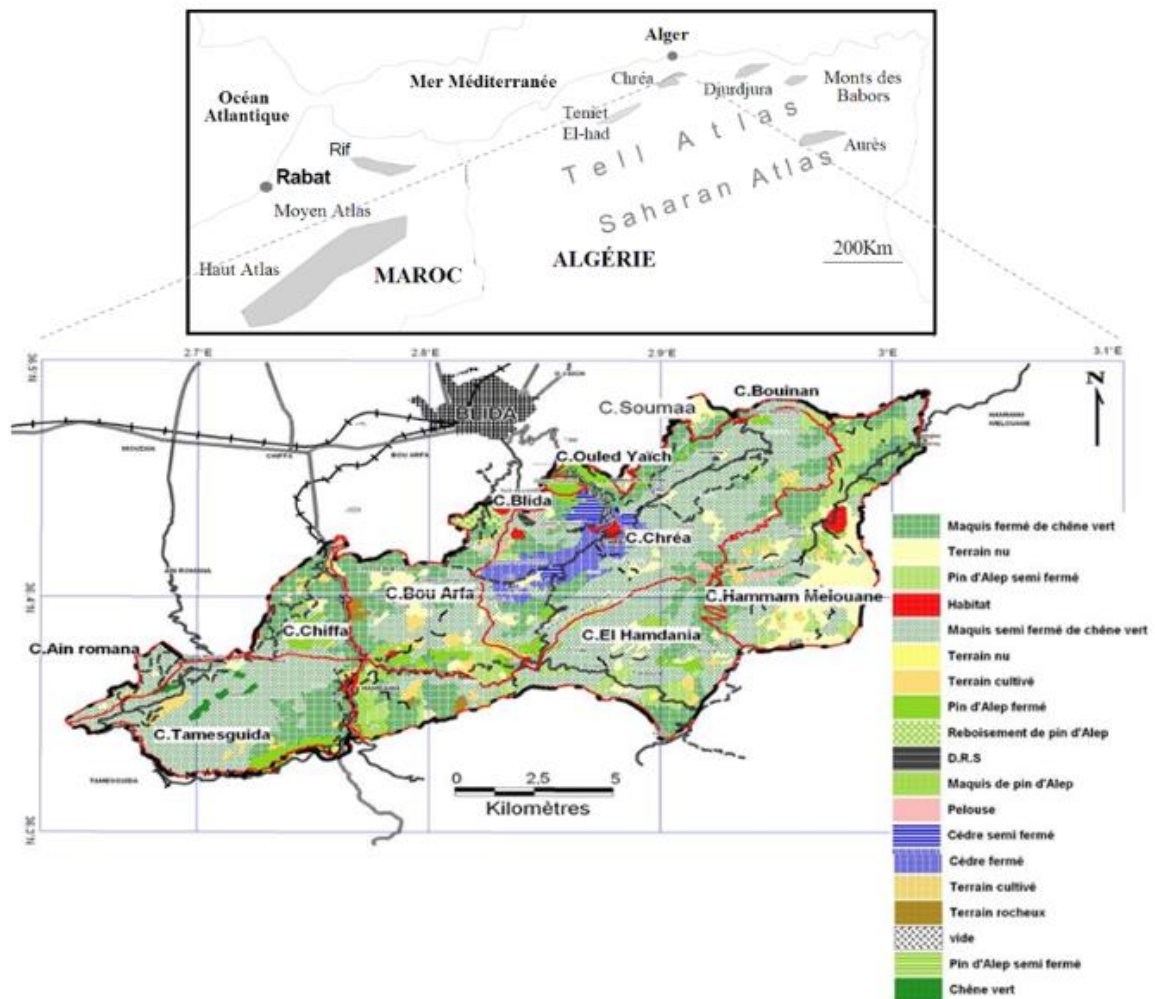


Figure 2.3 : Présentation de la zone d'étude [120]

Il couvre environ 27000 ha de hautes montagnes (900-1550 m) et se caractérise par une topographie accentuée et accidentée à sols schisteux. La cédraie de Chréa occupe les altitudes les plus élevées dans la partie centrale du parc entre 1300 et 1550 m. Elle couvre approximativement une superficie de 1200 ha avec une densité généralement élevée (distance entre les arbres : environ 3 à 5 m). Les essences ont entre 80 et 120 ans, une hauteur de 15 à 25 m et une circonférence de 40 à 65

cm. Cependant, sur les pentes du versant Sud, les hautes crêtes sont dénudées, et la densité des arbres est plus faible (environ 70~100 arbres/ha) [118 ; 119]. En raison de l'altitude, le sous-bois est principalement constitué d'herbes ainsi que certaines espèces d'arbustes telles que *Taxus baccata* L., *Ilex aquifolium* L., *Acer obtusatum* Willd., *Juniperus oxycedrus* L. et d'autres arbustes présents individuellement ou en groupes [107].

### 2.3. Sites d'échantillonnage

Compte tenu des objectifs de l'étude, les principaux critères de choix des parcelles d'échantillonnages ont porté sur l'ouverture de la canopée (zone canopée et zone hors canopée) et les versant (Nord et Sud). Le choix des sites s'est limité à des parcelles de cédraie fermée, dont l'historique est connu (feu de forêt, pression des riverains, etc....).

Ajouté à cela, et dans le but de considérer les impacts des changements globaux sur la viabilité de l'espèce étudiée, deux éléments ont été aussi pris en compte dans la localisation de la zone d'étude : (i) la présence du Parc National de Chréa dans un territoire fortement urbanisé, peuplé à flux touristiques assez importants à éviter et (ii) une présence forte et abondante de Cèdres de l'Atlas.

En effet, un déclin et une mise en danger de l'espèce ont été constatés sous l'effet des changements climatiques, accentué par des impacts anthropiques induits par une fréquentation et des dégradations du site incontrôlées. Par ailleurs, on assiste de plus en plus, au remplacement d'un tourisme « avisé » et responsable par un tourisme de masse peu respectueux de l'essence forestière et de la préservation de son environnement. Au vu de ce qui précède, il a été conclu que l'identification et la localisation des sites d'échantillonnage (expérimentation), doivent être à l'écart des zones à grand flux touristique, afin que les informations recueillies puissent faire l'objet d'un traitement étho-écologique destiné à la gestion des cédraies naturelles.

Les deux sites expérimentaux choisis font partie intégrante de la zone tampon. Le site du versant Nord occupe un espace d'environ 4 ha, constitué d'une cédraie fermée (latitude 36°25'58.1"Nord et longitude 2°53'19.9"Est) à une altitude de 1550



m. Le site du versant Sud s'étale quant à lui sur 8 ha en une cédraie fermée (latitude 36°25'47.9" Nord et longitude 2°53'20.5" Est) pointant à une altitude de 1436 m. (Fig. 2.4).

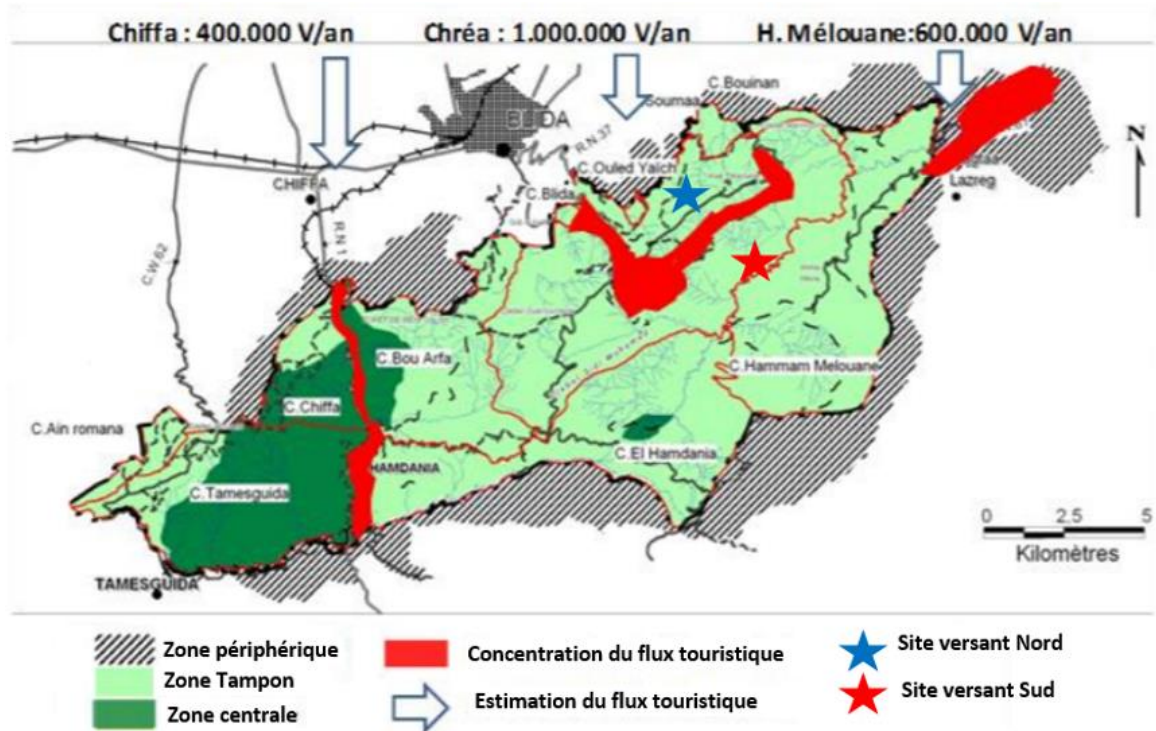


Figure 2.4 : Présentation du site de l'étude [120]

Au niveau des sites d'échantillonnages, les essences de cèdre sont peu serrées et la litière est épaisse. Le *Quercus ilex* (pour la strate arborescente), *Cadinus sp*, *Sedum villasum*, *Senicio vulgaris*, et *Paranychia argenta* (pour la strate herbacée) sont les principales espèces végétales présentes en association au Cèdre de l'Atlas.

La figure 2.5, ci-dessous, illustre la répartition de la végétation au niveau du Parc National de Chr a, et donne une idée précise de la localisation de la cédraie.

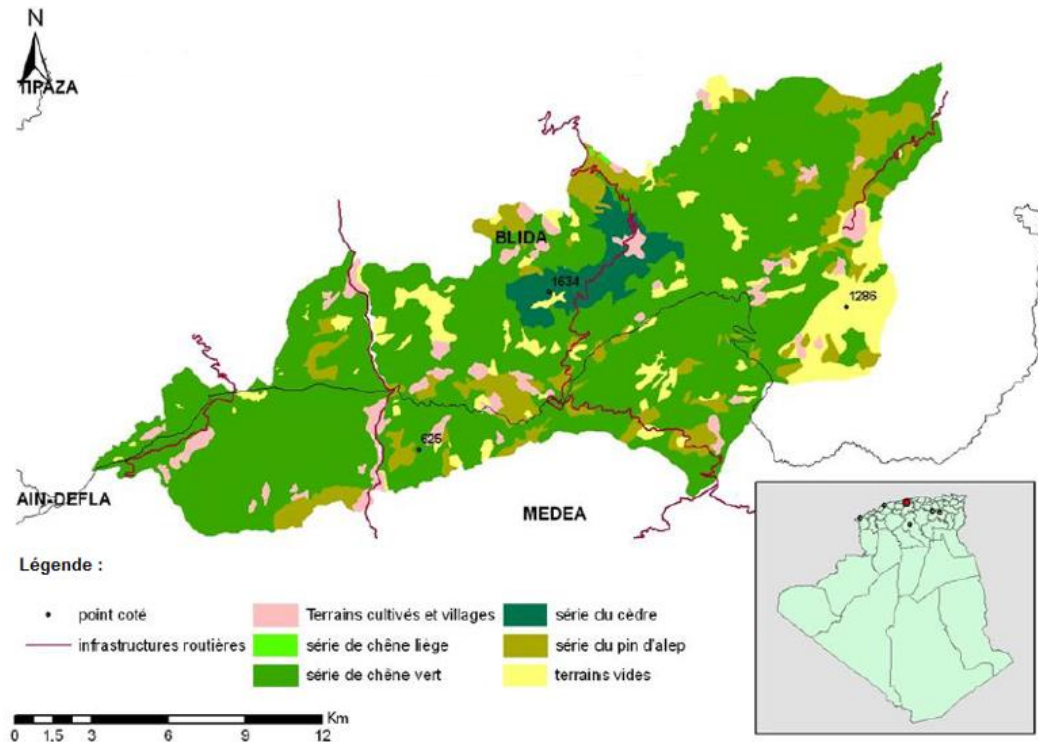


Figure 2.5 : Carte de la localisation de la cédraie dans le PNC [120].

## 2.4. Étude des réseaux trophiques pédofauniques

### 2.4.1. Techniques d'échantillonnage

Les échantillons du sol ont été réalisés sur un profil pédologique dans deux points (endroits) pour chaque site expérimental. Les échantillons effectués dans la rhizosphère située sous l'étalement des branchages du cèdre est nommé « zone canopée » (Fig. 2.6 a), alors que les échantillons ont été prélevés en dehors des étalements des branchages en « zone hors canopée » (Fig. 2.6 b).

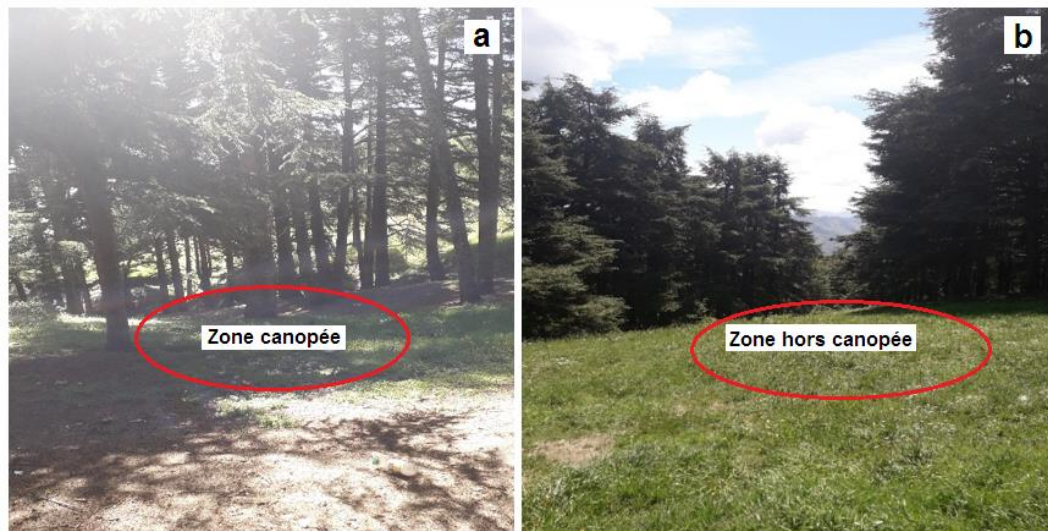


Figure 2.6 : Présentation des zones des prélèvements (Original ,2016)

Pour les études des réseaux trophiques, il est indispensable de sacrifier une partie des populations présentes. Il convient d'adapter les prélèvements afin de limiter l'impact sur le milieu en disposant d'un échantillon représentatif de la population. Cette adaptation se fait au cas par cas, elle peut nécessiter un essai sur le terrain avant de fixer la durée ou l'intensité du prélèvement. Le but n'est pas de vider le milieu mais d'en avoir une représentation la plus fiable possible et la plus acceptable du point de vue scientifique.

Le plan d'échantillonnage adopté rejoint la méthode non spécifique (Échantillonnage suivant la méthode Tropical Soil Biology and Fertility). Elle cible la pédofaune macrofaune endogée (larves ou adultes). Cette méthode consiste à prélever un échantillon de sol de 25 cm de côté sur une profondeur de 30 cm. La récolte de la faune se fait après avoir partagé l'échantillon en 3 horizons suivant des gradients de profondeurs (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm) (Fig. 2.7). De janvier 2016 à décembre 2016. Chaque mois, à raison de deux sorties par mois, quatre (04) profils pédologiques sont réalisés (canopée-nord, hors canopée-nord, canopée-sud et hors canopée-sud) par sortie, totalisant 288 points de prélèvements durant les 12 mois. Ces derniers sont effectués sur chacun des trois horizons (H1/0-10cm, H2/10-20cm et H3/20-30cm) sur l'ensemble des profils pédologiques. Les 4 points de prélèvements ont été choisis de façon casualisée à l'intérieur d'un carré de 10 m de côté. Les échantillons de sol de chaque horizon sont mis séparément dans des

sachets en plastique hermétiquement fermés et référenciés qui seront ensuite transportés au laboratoire pour extraction et tri des spécimens pédofauniques.

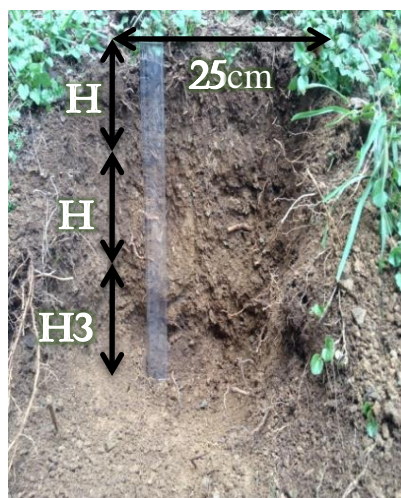


Figure 2.7 : Présentation des horizons pédologiques (Original, 2016)

#### 2.4.2. Préparation, identification et dénombrement de la pédofaune

##### 2.4.2.1. Préparation, identification et dénombrement des nématodes

Les nématodes sont extraits de 250 cm<sup>3</sup> de sol en utilisant la méthode des seaux de Dalmasso [121], dite méthode de flottaison et de sédimentation. Elle est basée sur les différences de densité entre les nématodes et les différentes parties du sol. Elle nous permet d'extraire les nématodes de différentes tailles, du sol en superposant des tamis à différentes mailles. Cette méthode est très rudimentaire mais demande un équipement minimal et est peu coûteuse. L'identification morphologique est basée sur l'observation de certains caractères discriminants tel que, la présence ou l'absence du stylet, sa longueur et sa forme ; la forme de la tête et de la queue ; la longueur du corps et la disposition de la glande œsophagienne par rapport à l'intestin. Les nématodes ont été identifiés jusqu'au genre selon la clé dichotomique de Jacob et Middepijns [122], en utilisant le stéréo microscope. Les collections du laboratoire de zoologie agricole et forestière du département des Biotechnologies (Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université Blida<sup>1</sup>, Algérie) ont également été utilisées comme référence.

L'évaluation de la disponibilité des nématodes dans les différents échantillons est réalisée grâce à une cellule de comptage, sous loupe binoculaire. Les populations de nématodes du sol sont exprimées en nombre de nématodes par 1 L de sol [123].

#### 2.4.2.2. Préparation, identification et dénombrement de la méso et la macrofaune

Les communautés ciblées sont la méso et macrofaune endogées (larves ou adultes) préparées, identifiées et dénombrées grâce au tri manuel pour la macrofaune et à l'Extracteur de Berlese Tullgren pour la mésofaune. Son principe consiste à placer un volume connu de terre dans un entonnoir, dont le trou de sortie est fermé par un grillage, et de le soumettre à la chaleur d'une lampe à incandescence. La faune, chassée par le sec, migre vers le fond de l'entonnoir puis tombe à travers le grillage jusqu'à un récipient contenant un liquide conservateur (alcool à 70%). Pour la mésofaune (acariens, collembole,...), on réalise l'extraction sur plusieurs petits échantillons homogènes (autour de 200 cm<sup>3</sup>) issus du regroupement de plusieurs prélèvements. [124].

Ainsi, les échantillons transportés au laboratoire sont mis dans des appareils de Berlese Tullgren. Dans chaque entonnoir en plastique, on place des tamis à mailles 2 mm dans lesquels on met les échantillons du sol sur un flacon, contenant de l'eau et une faible quantité de détergent (10 ml de formaldéhyde pour 1 litre d'eau) qui ferme la base de l'entonnoir. Les échantillons sont progressivement desséchés au moyen d'une lampe placée au-dessus des entonnoirs. Les organismes fuyant le dessèchement finissent par tomber dans le flacon de récolte. Après 15 jours de dessèchement, l'observation et le tri des spécimens sont réalisés sous une loupe binoculaire. Les techniques de reconnaissances et identifications utilisées pour les différentes familles, genres et espèces sont contenues dans divers ouvrages que nous avons consulté [79, 125 ; 126 ; 127 ; 128 ; 129 ; 130 ; 131 ; 132 ; 133 ; 134 ; 135 ; 136 et 137]. Néanmoins, les principales déterminations ont été confirmées par Pr Ghezali, de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie d'El Harrach, Alger (Algérie).

#### 2.4.3. Analyses écologiques des données

Les résultats ont été exprimés sous forme de richesse totale (S), représentant le nombre d'espèces capturées au niveau de chaque site au cours d'une session d'échantillonnage [138]. La richesse des espèces a été calculée selon le programme de raréfaction du logiciel Past vers. 1.81 [139]. Nous avons appliqué les analyses de richesse d'espèce sur les limites supérieures et inférieures à hauteur d'un intervalle de confiance de 95%. Ce qui définit le nombre prévu d'espèces représentées parmi un nombre donné d'individus [140]. De plus, les résultats ont été exprimés en tant que fréquence (F%), ce qui représente la proportion en pourcentage du nombre d'individus (ni) par rapport au nombre total d'individus capturés de toutes les espèces d'une station (N) [141]. La constante des espèces a été appréhendée (C%). Elle exprime le pourcentage du nombre de relevés contenant l'espèce étudiée par rapport au nombre total de relevés [110].

On considère qu'une espèce est :

Accidentelle : si  $C\% < 25\%$ : dans ce cas l'espèce arrive par accident ou par hasard.

Elle n'a aucun rôle dans le peuplement,

Accessoire : si  $25\% \leq C\% \leq 50\%$ . Celle-ci n'appartient pas au peuplement mais sert à son fonctionnement,

Régulière : si  $50\% \leq C\% \leq 75\%$ ,

Constante : si  $75\% \leq C\% \leq 100\%$ ,

Omniprésente : si  $C\% = 100\%$ .

Les espèces constantes et omniprésentes sont les plus dominantes, car elles ont plus de nourriture et occupent une étendue plus vaste.

Le diagramme des Fréquences-Abondances des peuplements de nématodes a été considéré pour chaque site. La fréquence correspond au pourcentage d'échantillons dans lesquels le genre ou l'espèce a été trouvé(e). Le seuil de fréquence dans le sol est de 30%. Quant à l'abondance, elle correspond au logarithme décimal  $\log(N+1)$ , ou N est la moyenne des effectifs des taxons dans les échantillons où ils ont été trouvés. Le seuil d'abondance est de 200 N/dm<sup>3</sup> de sol ( $\log 200 = 2,30$  N/dm<sup>3</sup>) (Fig. 2.8) [142].



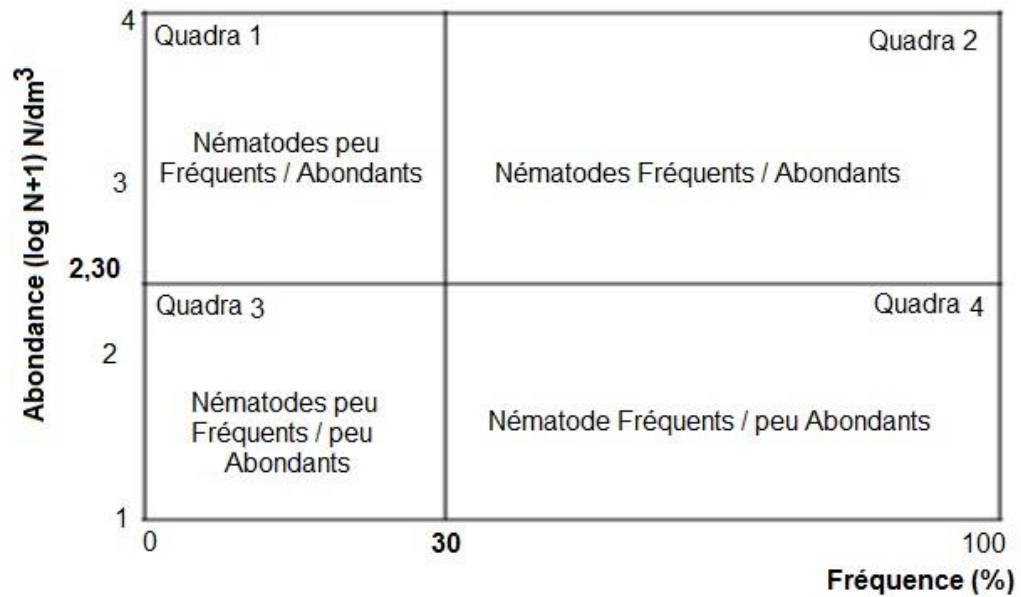


Figure 2.8 : Diagramme Fréquences–Abondances [143]

Pour expliquer la diversité des peuplements de nématodes, nous avons également utilisé l'indice de Shannon ( $H = - \sum P_i \times \log (P_i)$ , où  $P_i = n_i / N$ ). ( $H$ ) augmente avec ( $S$ ), mais ne dépasse pas dans la pratique 5,0 dans les peuplements biologiques [142]. L'indice d'équitabilité ( $E$ ) indique la répartition de l'espèce dans le peuplement. Il dérive de  $H$  ( $E=H/\ln S$ ) [141].

Les valeurs variaient de 0 (une espèce dominante) à 1 (toutes les espèces étant également représentées dans le peuplement).

## 2.5. Étude des caractéristiques physico-chimiques du sol sous cédraie

### 2.5.1. Évaluation de la granulométrie

Les fractions granulométriques sont déterminées par la méthode internationale de sédimentation à la pipette de Robinson. Elle consiste à détruire la matière organique par attaque à l'eau oxygénée à 30 volumes, puis disperser les particules de sol par l'hexamétaphosphate de sodium, pour prélever par la suite les particules fines (argiles, limons) grâce à la pipette de Robinson et récupérer les particules grossières (sables fins et sables grossiers) par tamisage [144].

### 2.5.2. Évaluation du potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH est mesuré par le biais d'un pH mètre avec extrait de sol dilué d'un rapport sol/eau (1/ 2.5).

### 2.5.3. Évaluation de la matière organique (MO)

La méthode de détermination de la matière organique est réalisée par le dosage du carbone organique. La plus indiquée est la méthode d'ANNE que nous avons utilisée pour déterminer le taux de la matière organique dans le sol. Elle consiste à oxyder, à chaud (105C°), par le mélange de 10 ml de bichromate de potassium (8%) et 15 ml d'acide sulfurique concentré avec 0.5 g de sol finement broyé, pendant 5 minutes, après ébullition laissant notre mélange refroidir et on prélève 20 ml de cette solution en ajoutant 3-4 gouttes de diphénylamine (indicateur faisant passer la solution du brun violacé au bleu verdâtre) et 5 ml de fluorure de sodium (NaF à 3%) puis titrant avec la solution de sel de MOHR (0.2N) en notant son volume (n') au moment du virage au bleu verdâtre [145].

Le pourcentage de carbone est calculé par la formule suivante :

$$C\% = \frac{(n' - n) \cdot 0.615}{P}$$

Le taux de la matière peut être déterminé ainsi :

$$MO\% = C\% \cdot 1.72$$

Avec : **MO%** : Matière organique, **C%** : Taux de Carbone, **P** : Poids de sol, **n'**: Volume de sel de MOHR titré sur sable calciné, **n** : Volume de sel de MOHR titré sur sol échantillonné.

## 2.6. Étude de l'expression végétative et de l'activité physiologique du cèdre

### 2.6.1. Techniques d'échantillonnage

Les échantillonnages ont été effectués du mois de janvier 2016 au mois de décembre 2016, à raison d'un prélèvement par mois afin de couvrir l'activité



annuelle de l'essence. Les deux parcelles expérimentales (versants Nord et Sud) ont été découpées selon la méthode des transects en 3 blocs de 9 à 10 arbres, les blocs étant distants les uns des autres de 24 m [146]. La technique de prélèvement destructif a été effectuée sur 10 rameaux (de 10 cm de long) au total obtenues par le biais du choix aléatoire. Le matériel végétal a été ensuite déposé dans des sachets en papier qui ont été stockés à 4°C afin de ralentir toute activité physiologique jusqu'à la caractérisation phytochimique.

### 2.6.2. Évaluation de l'expression végétative

Sur chaque rameau de 10 cm, nous avons estimé le nombre de touffes de feuilles (Fig. 2.9 a) et le poids massique de 10 touffes (poids frais et poids sec) (Fig. 2.9 b).

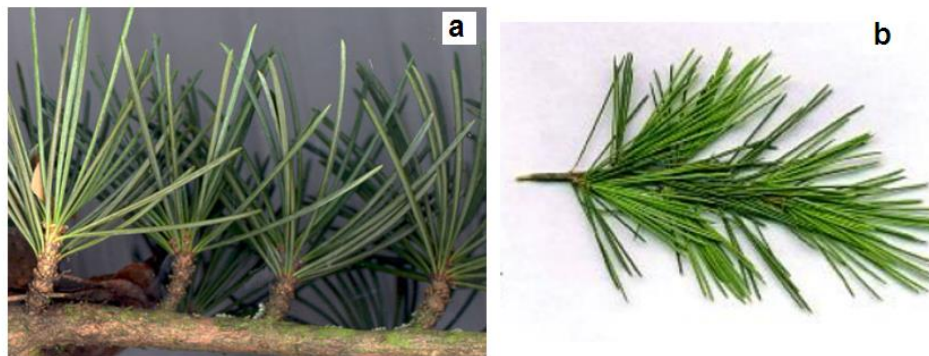


Figure 2.9 : Rameau de cèdre avec touffes d'aiguilles. (Original, 2016)

### 2.6.3. Évaluation de l'expression photosynthétique

La méthode proposée par Lichtenthaler [147] a été utilisée pour mesurer la chlorophylle (A, B et totale) et les caroténoïdes. Des feuilles (aiguilles) fraîches (0,1 g) ont été mélangées à 4 ml d'acétone (80 %) et centrifugés à 3000 tr/min pendant 10 min. L'absorbance du surnageant a été lue à 647, 664 et 470 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. La chlorophylle a, la chlorophylle b, les caroténoïdes et le contenu en chlorophylle totale ont respectivement été déterminés comme suit :

$$\text{CHL A} = 12,21 (A_{664}) - 2,79 (A_{647})$$

$$\text{CHL B} = 21,21 (A_{647}) - 5,1 (A_{664})$$

$$\text{CAROTENOIDE} = (1000 \times A_{470} - 1,8 \times \text{CHL A} - 85,02 \times \text{CHL B}) / 198$$

$$\text{CHL T} = \text{CHL A} + \text{CHL B}$$

#### 2.6.4. Évaluation de l'activité phytochimique

Il a été utilisé des techniques de tests qui permettent de déterminer les différents groupes chimiques contenus dans un organe végétal et d'identifier la présence des substances chimiques. Ces tests sont basés sur des réactions de précipitation et de complexation avec formation de complexes insolubles et colorés. La coloration observée et provoquée par l'utilisation d'un réactif approprié, est due généralement à la formation d'une conjugaison ou d'une insaturation dans une molécule.

##### 2.6.4.1. Extraction et quantification de la proline et des acides aminés

L'extraction a été réalisée selon la méthode décrite par Naidu [148] : 50 mg d'échantillons ont été placés dans des tubes de centrifugation contenant 5 ml d'un mélange (méthanol (60 ml), chloroforme (25 ml) et eau distillée (15 ml)). Les tubes scellés ont été chauffés au bain marie (60°C) durant 02 heures et centrifugés à 5000 G pendant 10 minutes. Le surnageant a servi ensuite aux dosages des acides aminés solubles et de la proline.

La proline a été déterminée par une méthode développée par Singh [149], qui consiste à mélanger 1 ml de surnageant, 4 ml de solution de Ninhydrine, 4 ml d'acide acétique glacial et 1 ml d'eau distillée, qui sont placés dans des tubes de centrifugation de 10 ml. Ce mélange a été chauffé au bain marie (90°C) pendant 45 minutes et refroidi à la température ambiante. L'absorbance a été lue à 520 nm au spectrophotomètre. Et pour les acides aminés on prend 1ml de solution tompon acide acétique/acétate de sodium et 1ml de Ninydrine qui vont être additionnés à 1ml de surnageant puis agités et chauffés au bain marie (95°C) pendant 15 min. L'absorbance des essais a été lue à 570nm.

##### 2.6.4.2. Extraction et quantification des sucres totaux solubles

Les sucres totaux (saccharose, glucose, fructose, leurs dérivés méthyles et les polysaccharides) ont été dosés par la méthode de Dubois [150]. Elle consiste à ajouter 3 ml d'éthanol (80 %) à 100 mg de matière végétale fraîche.

Le mélange est laissé à température ambiante pendant 48 heures. Au moment du dosage, l'éthanol est évaporé par passage à l'étuve à 80°C. L'extrait obtenu est additionné à 10 ml d'eau distillée.

Une prise d'essai de 0.5 ml de la solution analysée est mélangée à 0.5 ml de phénol (5%). On ajoute rapidement à ce mélange 2.5 ml d'acides sulfurique concentré (96%). Le mélange vire à la couleur jaune-orange. Après homogénéisation au vortex, l'échantillon est placé au bain marie pendant 10 à 20 minutes à une température de 30°C. La couleur de la solution est stable pendant plusieurs heures. L'absorbance est lue à 485 nm au spectrophotomètre. Les valeurs obtenues sont reportées sur la gamme étalon, à l'aide de l'équation suivant :

$$Y = 4,3918 x - 0.1946$$

Avec : Y: étant l'absorbance. X: étant la quantité des sucres totaux exprimée en mg/g.m.f.

#### 2.6.4.3. Extraction et quantification des protéines

Deux méthodes ont été utilisées pour l'analyse de la fraction organique, la méthode proposée par Bradford [152] pour le dosage des protéines solubles et celle d'Ammar *et al.* [152], pour le dosage des protéines hydrosolubles. Ainsi, 3 g de matière fraîche foliaire, préalablement broyés, ont été mis dans 5 ml de tampon phosphate (pH=7) contenant du polyvinilpyrrolidone. La précipitation a été facilitée par une centrifugation pendant 15 minutes à 4500 tr/min à -4°C. Le surnageant contenant les protéines pariétales est récupéré dans un autre tube et le culot est dissout dans 5 ml d'eau distillée et à nouveau centrifugé pour éliminer les résidus du tampon phosphate. Le culot est récupéré et redissout dans une solution tampon phosphate + KCl (pH=7) et à nouveau centrifugé. Le surnageant résultant contenant les protéines cytoplasmiques a été récupéré pour le dosage de ces dernières.

Les valeurs d'absorbance ( $\lambda=595$ ) ont permis de calculer la concentration initiale de protéines contenues dans les échantillons au moyen d'un courbe étalon standard effectuée avec une protéine de référence (Ovalbumine) de manière à réaliser une série de dilutions à 7 points. Les valeurs obtenues sont converties en concentrations de protéines selon la formule suivante :

$$\text{Teneur en protéines (mg/g MF)} = \frac{\text{Quantité de la protéine (mg)} \times 200}{\text{Poids d'échantillon}}$$

**200** : étant le coefficient de dilution.

#### 2.6.4.4. Quantification de la teneur en cendres totales

Elle consiste à un passage au four de 2 g d'échantillon broyé dans une capsule tarée à une température de 550°C, jusqu'à destruction totale de toute particule carbonneuse (couleur grise claire ou blanchâtre) (Otope, 2004).

La teneur en cendres est calculée comme suit :

$$\text{Cendre \%} = 100 - \text{MO\%}$$

Avec : **MO** : Matière organique

#### 2.6.4.5. Extraction et quantification des polyphénols

Le protocole d'extraction utilisé dans ce travail pour les polyphénols est celui d'Oomah [153], qui consiste à dissoudre 0,8 g du broyat végétal (aiguilles) dans 32 ml d'éthanol (96%).

Le mélange est agité pendant deux heures à température ambiante suivi d'une centrifugation pendant 10 minutes à 5000 tr/min. Le surnageant est filtré et récupéré dans des tubes à essai puis conservé au frais.

Le dosage des polyphénols totaux a été effectué avec le réactif colorimétrique Folin-Ciocalteu selon la méthode citée par Skerget [154]. Dans des tubes à essais, on mélange 500 µl d'extrait dilué avec 2500 µl de Folin-ciocalteu dilué (1/10). Après agitation, le mélange est incubé pendant 3 minutes à température ambiante, ensuite on ajoute 2000 µl de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (7,5%). Les tubes à essais sont ensuite passés au bain marie à 50 °C pendant 5 minutes. Une fois refroidis, l'absorbance est mesurée par spectrophotomètre à 760 nm.

## 2.7. Analyses statistiques des données

La comparaison des indices de structure a été réalisée par les méthodes d'inférence statistique permettant la simulation de données notamment les tests de Bootstrap et de Permutation. L'analyse a été effectuée avec le logiciel PAST vers. 1.81 [43], sur une matrice basée sur l'abondance des taxa dans les 4 sites. Pour explorer la différence de structure des peuplements de nématodes de la zone canopée et la zone hors canopée au niveau des versants Nord et Sud, des diagrammes de Rang-Abondance ont été tracés, et comparés au modèle de Motomura [155] :  $\log(N) = a \times R + b$ , où N est l'abondance (valeurs logarithmique) rassemblée pour une espèce et R est la pente [156]. Les comparaisons des pentes des communautés ont été faites en utilisant la procédure décrite dans PAST vers 1.81 [140]. Brièvement, les analyses de covariance ont été conduites en considérant les pentes comme moyennes et les carrés des erreurs standards des valeurs x comme les variances. La probabilité correspondante est calculée avec le test de Barlett.

Les données recueillies sur la disponibilité des taxons au niveau des sites d'étude ont été analysées afin de dégager les caractéristiques majeures de distribution. Une analyse de la variance type GLM a été réalisée sur des moyennes homogènes adoptées sur la base d'un coefficient de variance (C.V.<15%). Les contributions significatives retenues sont au seuil d'une probabilité de 5%, les calculs ont été déroulés par le logiciel SYSTAT version 12.0 [157].

La tendance de la variation temporelle des communautés pédofauniques de la cédraie par rapport à leurs réactions aux versants du Parc National de Chréa nous a été établie par une analyse multivariée de type D.C.A. (Detrended Correspondance Analysis). La projection des variables sur les deux axes de l'analyse multivariées a été conduite avec le logiciel (PAST vers. 1.37) [140].

## CHAPITRE 3

### RÉSULTATS

Les résultats sont présentés en 3 parties :

***i)* L'effet du versant du Parc National de Chréa sur la fertilité biologique du sol forestier sous Cèdre.** Cette partie s'est focalisée sur l'étude de l'influence des saisons et celle des horizons pédologiques sur la dynamique de la microfaune (Nématodes), la mésofaune (Collemboles et Acariens) et la macrofaune (Myriapodes et Lombrics).

***ii)* La structuration des cascades trophiques.** Nous nous sommes penchés sur les interactions trophiques dans la chaîne alimentaire des espèces pédofauniques dans un contexte de variation de microclimat pédologique (versant).

***iii)* Les relations entre la fertilité biologique du sol et l'expression végétative phytochimie du Cèdre de l'Atlas.** Nous nous sommes intéressés à mettre en évidence l'effet de la diversité pédofaunique sur l'expression végétative, l'activité photosynthétique et le remaniement biochimique des constituants alimentaires et non alimentaires des aiguilles du Cèdre de l'Atlas à travers l'exposition du peuplement forestier (Nord et Sud).

#### 3.1. Effet du versant du Parc National de Chréa sur la fertilité biologique du sol forestier sous Cèdre

##### 3.1.1. Estimation de la richesse spécifique

Les résultats de l'inventaire des Nématodes, des Lombrics, des Myriapodes, des Acariens et des Collemboles au niveau des profils pédologiques de la cédraie fermée du Parc National de Chréa reportés dans les figures de raréfaction (Fig. 3.1), montrent que l'abondance globale est en relation avec les versants. Il ressort une très faible divergence de faiblesse dans la gradation du nombre de taxa entre le versant Nord et le versant Sud. Cette raréfaction se traduit chez les nématodes à

partir de 10 taxa et une échelle de 5600 spécimens pour le versant Nord (Fig. 3.1a). Elle est de 11 taxa avec une échelle de 7200 spécimens pour le versant Sud (Fig. 3.1b). Cependant, la curve de raréfaction se traduit chez la mésofaune et la macrofaune à partir de 7 taxa et une échelle de 600 spécimens pareillement pour les deux versants (Fig. 3.1c et d). La tendance des profils du nombre d'espèces par rapport au nombre d'individus réconforte le dispositif d'échantillonnage de la présente étude (Fig. 3.1).

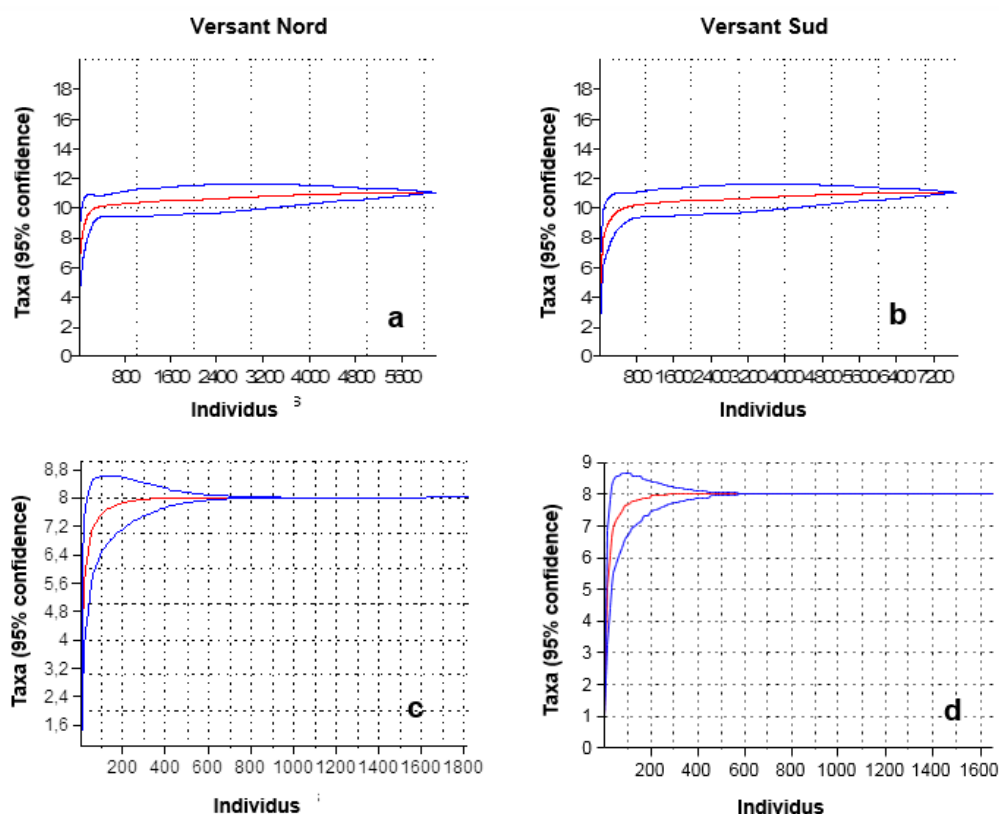


Figure 3.1 : Curve de raréfaction  
(a, b) Nématodes, (c, d) méso et macrofaune

### 3.1.2. Inventaire de la pédofaune rencontrée sous Cèdre de l'Atlas

Les analyses nématologiques ont dévoilé la présence de 10 genres, réparties entre 8 Familles (Tableau 3.1). Parmi lesquels, *Helicotylenchus*, *Ditylenchus*, *Aphelenchoides*, *Aphelenchus* et *Monochus* sont les plus représentés sur le versant Nord. Pour ce qui est du versant Sud, les genres *Tylenchus*, *Dorylaimus*, *Eurydorylaimus*, *Ecuminus* et *Cephalobus* marquent une représentativité plus

prononcée. Les *Pratylenchus* sont les spécimens les moins représentés et sont présents pareillement sur les deux versants.

Tableau 3.1 : Nématodes de la cédraie du Parc National de Chréa

Famille	Genre	Espèce	Code	Versant Nord	Versant Sud
				<i>Ni</i>	<i>ni</i>
Tylenchidae	Tylenchus	<i>Tylenchus sp.</i>	Tyl	604	644
	Ditylenchus	<i>Ditylenchus sp.</i>	Dity	1613	2149
Pratylenchidae	Pratylenchus	<i>Pratylenchus sp.</i>	Praty	2	2
Hoplolaimidae	Helicotylenchus	<i>Helicotylenchus sp.</i>	Helico	65	38
Aphelenchidae	Aphelenchus	<i>Aphelenchus sp.</i>	Aphes	90	51
Aphelenchoididae	Aphelencoides	<i>Aphelencoides sp.</i>	Aphus	67	38
Dorylaimidae	Eurydorylaimus	<i>Eurydorylaimus sp.</i>	Eury	95	118
	Ecumenicus	<i>Ecumenicus sp.</i>	Ecum	275	433
	Dorylaimus	<i>Dorylaimus sp.</i>	Dory	272	377
Cephalobidae	Cephalobus	<i>Cephalobus sp.</i>	Cephal	2578	3459
Monochidae	Monochus	<i>Monochus sp.</i>	Mono	523	388

Par ailleurs, la disponibilité de la mésofaune et de la macrofaune a montré la présence de 7 Familles (Tableau 3.2). Les Geophilidae, les Oribatidae, les Gamasidae et les Collembolae marquent le versant Nord en termes d'effectif. En revanche, les Lumbricidae, les Iulidae et les Phytoseiidae sont plus présents sur le versant Sud.

Tableau 3.2 : Méso et macrofaune de la cédraie du Parc National de Chréa

Famille	Genre	Espèce	code	Versant Nord	Versant Sud
				<i>Ni</i>	<i>ni</i>
Lumbricidae	Lumbricus	<i>Lumbricus terrestris</i>	Lom	197	260
Iulidae	Brachyiulus	<i>Brachyiulus sp.</i>	Bra	61	74
Geophilidae	Geophilus	<i>Geophilus sp.</i>	Geo	69	53
Oribatidae	Oribatida	<i>Oribatida sp.</i>	Ori	570	444
Phytoseiidae	Phytoseiida	<i>Phytoseiida sp.</i>	Phy	122	138
Gamasidae	Gamasida	<i>Gamasida sp.</i>	Gam	517	433
Collembolae	Collembola	<i>Collembola sp.</i>	Col	271	246



### 3.1.3. Effet de la canopée et des profils pédologiques sur la disponibilité de la pédofaune

#### 3.1.3.1. Effet sur la disponibilité des nématodes

Cette étude est basée sur la connaissance du recrutement des taxons (groupes fonctionnels) et donc la place trophique des espèces rencontrées lors des prélèvements. L'examen des relevés des échantillons de sols relatifs à la pédofaune de la cédraie fait apparaître plusieurs groupes distincts (Tableaux 3.1 et 3.2). Nous avons analysé les diversités selon l'ouverture de la canopée et des profils pédologiques par le Test Ternaire (en utilisant les abondances) afin de comparer les affinités entre les positions (canopée & hors canopée) et les profils (horizons) (Fig. 3.2). Le Test Ternaire permet, sur la base des abondances, de soulever leur rapprochement écologique.

D'après les résultats, au niveau du versant Nord, sous canopée, la figure (3.2a) fait constater que les taxons *Cephalobus sp.*, *Monochus sp.* et *Dorylaimus sp.* sont confinés similairement aux trois horizons (H1, H2 et H3), avec une tendance de forte disponibilité au niveau des horizons H1 et H2. Pour ce qui est des taxons *Aphelenchus sp.*, *Aphelencoides sp.*, *Tylenchus sp.*, *Ditylenchus sp.*, *Eurydorilaimus sp.* et *Ecumenicus sp.* l'horizon superficielle H1 (0–10cm) est préféré. Enfin, *Helicotylenchus sp.* caractérise seule l'horizon médium H2 (10-20 cm). En hors canopée, la figure (3.2b), annonce un recrutement assez abondant en taxons similaire au niveau des trois horizons. En plus de *Cephalobus sp.*, *Monochus sp.* et *Dorylaimus sp.* qui ont investis les mêmes horizons sous canopée, nous signalons la disponibilité supplémentaire de *Tylenchus sp.*, *Ditylenchus sp.* et *Aphelencoides sp.*. Pareillement, la disponibilité des taxons au niveau de l'horizon H1, a été structurellement modifiée avec l'installation d'un nouveau réseau représenté par le recrutement de *Pratylenchus sp.*, *Aphelenchus sp.*, *Helicotylenchus sp.*, *Eurydorilaimus sp.* et *Ecumenicus sp.*.

Par ailleurs, au niveau du versant Sud, sous canopée (Fig. 3.2c), et hors canopée (Fig. 3.2d), les trois horizons s'individualisent par un réseau très similaire avec un penchant vers l'horizon H1. Il s'agit respectivement de *Eurydorilaimus sp.*,

*Helicotylenchus sp.*, et *Ecumenicus sp.*, associées à *Aphelenchus sp.* et *Aphelencoïdes sp.*. En revanche, les résultats affichent des structures complètement différentes qui sont recrutées au niveau de l'horizon superficiel (H1) au niveau des deux zones. Sous canopée, l'assemblage est constitué par *Aphelenchus sp.*, *Aphelencoïdes sp.*, *Tylenchus sp.*, *Ditylenchus sp.*, *Eurydorilaimus sp.* et *Ecumenicus sp.* (Fig. 3.2c). En hors canopée, l'assemblage est constitué par *Monochus sp.*, *Tylenchus sp.*, *Ditylenchus sp.*, *Aphelenchus sp.*, *Cephalobus sp.* et *Dorylaimus sp.* (Fig. 3.2d).

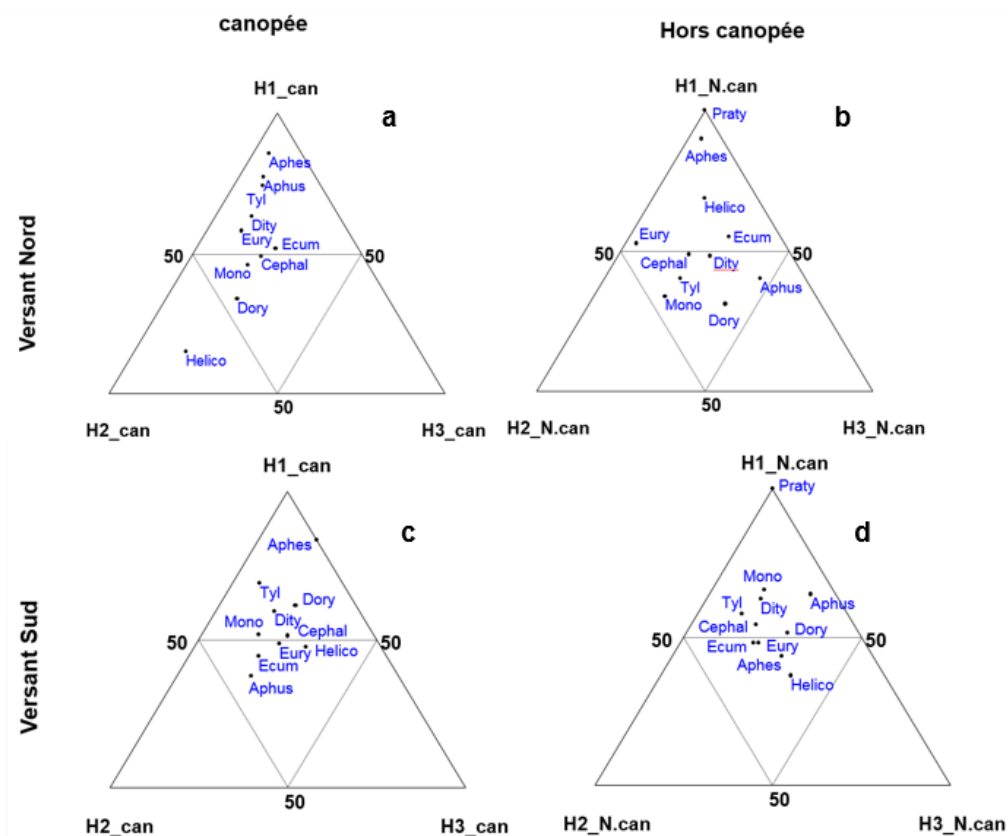


Figure 3.2 : Etude comparée des taxons de nématodes selon l'ouverture de la canopée et des profils pédologiques

(H1 : 0-10 cm, H2 : 10-20 cm, H3 : 20-30 cm, Aph : Aphelenchus ; Aphl : Aphelencoïdes ; Eury : Eurydorilaimus ; Dity : Ditylenchus Dory : Dorylaimus ; Ecum : Ecuminicus ; Tyl : Tylenchus ; Prat : Pratylenchus ; Helico : Helicotylenchus).

La contribution de chaque taxon aux différents états d'affinités observées au niveau des trois horizons a été calculée par le test de Wilcoxon (Paired tests) en utilisant les moyennes arithmétiques. Ce calcul permet de préciser pour chaque horizon

quelles sont les espèces caractéristiques de chaque position (canopée & hors canopée) en fonction des versants, et quelles sont les espèces communes.

La disponibilité des nématodes renseignée dans le tableau 3.3, montre une gradation négative par rapport à la profondeur du profil pédologique. Ainsi, au niveau du versant Nord, sous canopée, le gradient est au profit du profil H1<H2<H3. Toutefois, en hors canopée, le profil H1 se distingue nettement des profils H2 et H3. Par contre, au niveau du versant Sud, sous canopée ou en hors canopée, le profil H1 s'individualise par une suprématie numérique par rapport aux profils H2 et H3.

Tableau 3.3 : Disponibilité comparée des nématodes (Probabilité associée/ Moyennes arithmétiques)

<b>Versant Nord</b>	H1_canopée	H2_canopée	H3_canopée	H1_Hors canopée	H2_Hors canopée	H3_Hors canopée
H1_canopée	-	0,046*	0,007**			
H2_canopée	177,82/89,27	-	0,005**			
H3_canopée	177,82/52,90	89,27/52,90	-			
H1_Hors canopée				-	0,02*	0,009**
H2_Hors canopée				110,45/72,36	-	0,513 <sup>NS</sup>
H3_Hors canopée				110,45/53,27	72,36/53,27	-
<b>Versant Sud</b>	H1_canopée	H2_canopée	H3_canopée	H1_Hors canopée	H2_Hors canopée	H3_Hors canopée
H1_canopée	-	0,007**	0,005**			
H2_canopée	180,55/86,09	-	0,167 <sup>NS</sup>			
H3_canopée	180,55/64,27	86,09/64,27	-			
H1_Hors canopée				-	0,003**	0,005**
H2_Hors canopée				209/92,72	-	0,358 <sup>NS</sup>
H3_Hors canopée				209/65,54	92,72/65,54	-

H1 : 0-10 cm, H2 : 10-20 cm, H3 : 20-30 cm, NS : Non significative à 5%, \* : Significative à 1%, \*\* : Significative à 0,1%

### 3.1.3.2. Effet sur la disponibilité de la méso et la macrofaune

Les résultats du Test Ternaire, au niveau du versant Nord, sous canopée, illustrés par la figure (3.3a), font constater que les taxons *Lumbricus terrestris*, *Geophilus sp.*, *Collembola sp.* et *Brachyiulus sp.* caractérisent pareillement les trois horizons (H1, H2 et H3), avec une tendance de forte disponibilité au niveau de l'horizon H1. Tandis que les taxons *Phytoseiida sp.*, *Gamasida sp.* et *Oribatida sp.* mettent en exergue l'horizon superficielle H1 (0–10cm). En hors canopée, les trois horizons signalent une raréfaction en termes de taxons puisque seules *Phytoseiida sp.* et *Collembola sp.* qui y sont présentes. L'horizon H2, quant à lui, se distingue par le

taxon *Geophilus sp.*. Enfin, *Brachyiulus sp.*, *Gamasida sp.*, *Oribatida sp.* et *Lumbricus terrestris* différencient l'horizon superficiel par rapport aux autres horizons (Fig. 3.3b).

Pour ce qui est du versant Sud, sous canopée (Fig. 3.3c), et hors canopée (Fig. 3.3d), les trois horizons s'individualisent par un réseau très fortement similaire avec un penchant vers l'horizon H1. Il s'agit respectivement de *Lumbricus terrestris*, *Collembola sp.* et *Geophilus sp.*, associées à *Phytoseiida sp.* et *Brachyiulus sp.*. Aussi, les mêmes résultats affichent des structures très rapprochées au niveau de l'horizon superficiel (H1) au niveau des deux zones Sous canopée, (Fig. 3.3c) et En hors canopée, (Fig. 3.3d) avec une dominance des *Oribatida sp.* et *Gamasida sp.*.

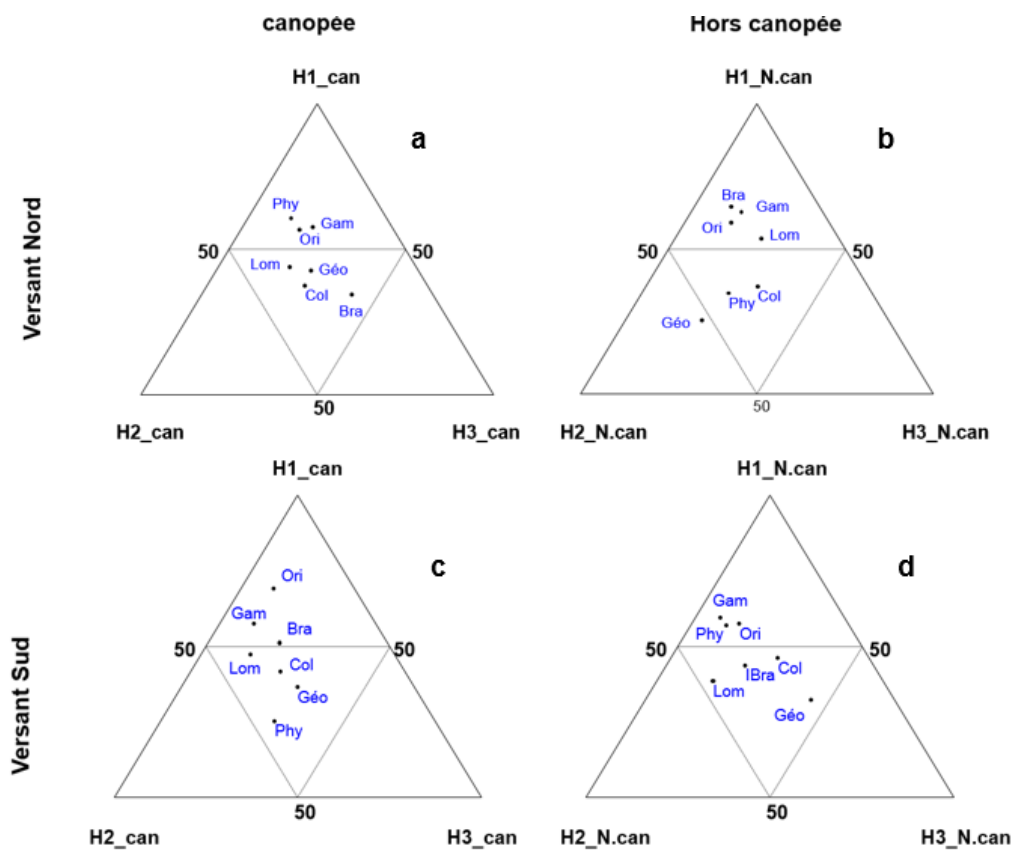


Figure 3.3 : Etude comparée des taxons de la méso et la macrofaune selon l'ouverture de la canopée et des profils pédologiques

(H1 : 0-10 cm, H2 : 10-20 cm, H3 : 20-30 cm, Lom : *Lumbricus*, Bra : *Brachyiulus*, Géo : *Geophilus*, Ori : *Oribatida*, Phy : *Phytoseiida*, Gam : *Gamasida*, Col : *Collembola*)

Les résultats obtenus par le test de Wilcoxon pour la méso et la macrofaune sont présentés dans le tableau 3.4, illustrant une gradation négative par rapport à la profondeur du profil pédologique. Ainsi, au niveau du versant nord, sous canopée,

le gradient est au profit du profil H1<H2<H3. En hors canopée, le profil H1 se distingue nettement des profils H2 et H3. En revanche, au niveau du versant Sud, sous canopée ou en hors canopée, le profil H1 s'individualise par une dominance numérique par rapport aux profils H2 et H3.

Tableau 3.4 : Disponibilité comparée de la méso et la macrofaune (Probabilité associée/Moyennes arithmétiques)

<b>Versant Nord</b>	H1_canopée	H2_canopée	H3_canopée	H1_Hors canopée	H2_Hors canopée	H3_Hors canopée
H1_canopée		0,015*	0,027*			
H2_canopée	86,14/44,57		0,042*			
H3_canopée	86,14/33,42	44,57/33,42				
H1_Hors canopée					0,009**	0,014*
H2_Hors canopée				53,42/29,28		0,062 <sup>NS</sup>
H3_Hors canopée				53,42/20,14	29,28/20,14	
<b>Versant Sud</b>	H1_canopée	H2_canopée	H3_canopée	H1_Hors canopée	H2_Hors canopée	H3_Hors canopée
H1_canopée		0,0611 <sup>NS</sup>	0,042*			
H2_canopée	58,57/34,01		0,027*			
H3_canopée	58,57/16,28	34,01/16,28				
H1_Hors canopée					0,0779 <sup>NS</sup>	0,027*
H2_Hors canopée				65,57/41,71		0,128 <sup>NS</sup>
H3_Hors canopée				65,57/19,28	41,71/19,28	

H1 : 0-10 cm, H2 : 10-20 cm, H3 : 20-30 cm,  
NS : Non significative à 5%, \*\* : Significative à 1%, \*\*\* : Significative à 0,1%

#### 3.1.4. Variation temporelle de la disponibilité de la pédofaune

La figure 3.4 présente la fluctuation spatio-temporelle des peuplements nématologiques sous l'effet du versant et de l'ouverture de la canopée de la cédraie. Dans l'esprit de mieux visualiser la tendance générale de la disponibilité des nématodes recensés, nous avons été conduits à tracer la courbe moyenne des abondances. Cette dernière, fait remarquer une tendance à la croissance progressive des abondances dès le début de la saison humide (novembre-décembre), avec un niveau global supérieur vers la fin de la même saison (février-mars-avril) au niveau des deux versants (Fig. 3.4a et c et Fig. 3.4b et d). De même, si l'on excepte le mois de mai pour la zone canopée versant Sud (Fig. 3.4b), le profil des abondances ont une tendance générale à une diminution graduelle durant l'installation de la saison sèche (Fig.3.4).

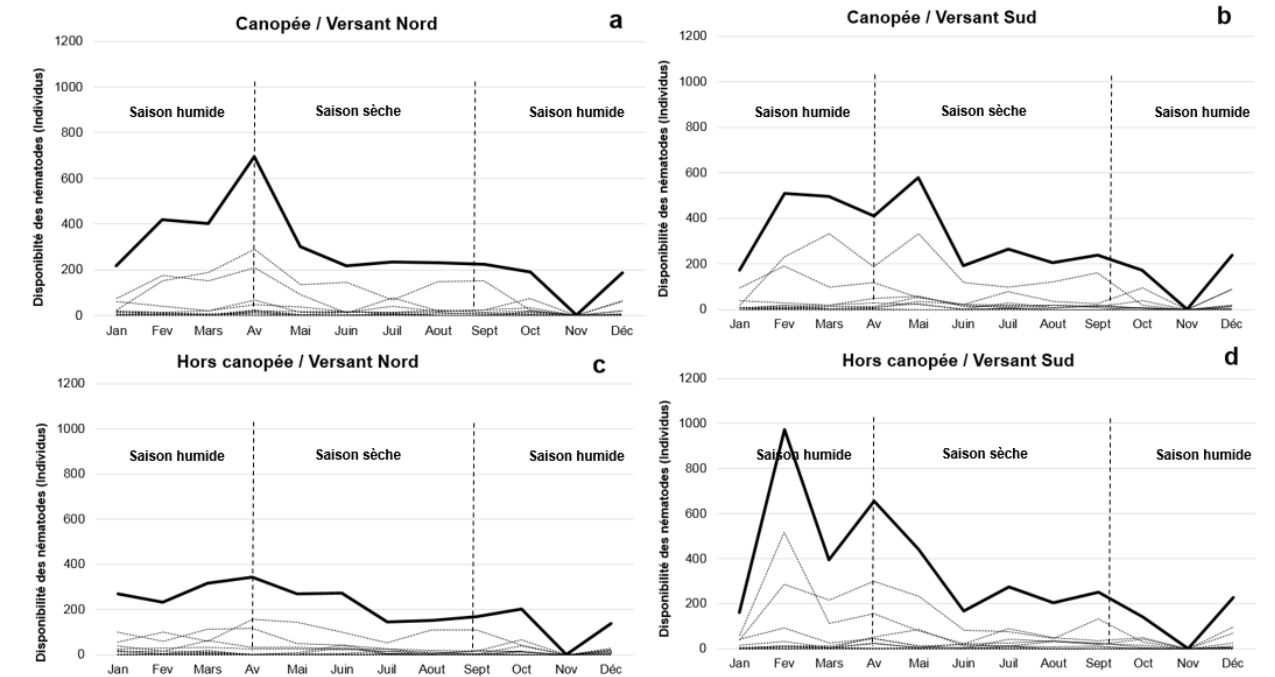


Figure 3.4 : Profil annuel des nématodes sous Cèdre de l'Atlas

Le modèle GLM appliqué à la disponibilité globale des nématodes, montre des différences significatives pour l'effet saison. On peut préciser que la saison humide dépasse significativement la saison sèche en termes d'abondance. La tranche numérique des abondances étant plus importante durant la saison humide (Fig. 3.5a). La zone canopée renferme les plus fortes abondances par rapport à la zone hors canopée. La tranche numérique des abondances, est en faveur de la zone canopée (Fig. 3.5b). Néanmoins, la différence significative des abondances signalée entre les versants, dépend des paliers de disponibilité. La fréquence est en faveur du versant Sud par rapport au versant Nord (Fig. 3.5c)

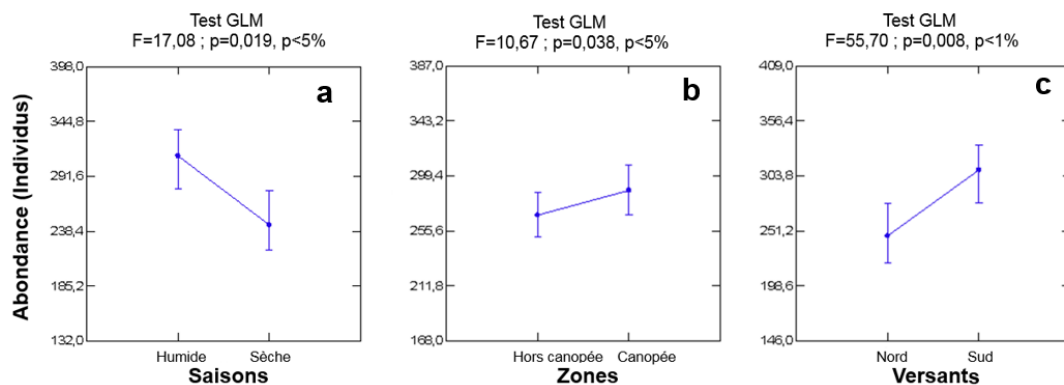


Figure 3.5 : Disponibilité comparée des peuplements de nématodes selon la saison, l'ouverture de la canopée et du versant

Concernant la fluctuation spatio-temporelle de la disponibilité de la méso et la macrofaune recensées, la tendance générale de la courbe moyenne d'abondance montre une même cinétique de recrutement de taxons caractérisé par une abondance maximale durant la saison humide et une faible disponibilité durant la période sèche pareillement sous canopée et hors canopée sur les deux versants (Fig. 3.6).

Sous canopée et sur les deux versants, se dégage le pic de fin de saison humide (septembre-décembre), qui culmine en termes d'abondance par rapport au pic du début de la saison humide (janvier-avril) (Fig. 3.6a et c).

En hors canopée et sur les deux versants, nous assistons à un recrutement inverse, où la saison humide (janvier-avril) est plus convoitée par la méso et la macrofaune par rapport à la saison humide étalée de septembre à décembre (Fig. 3.6b et d).

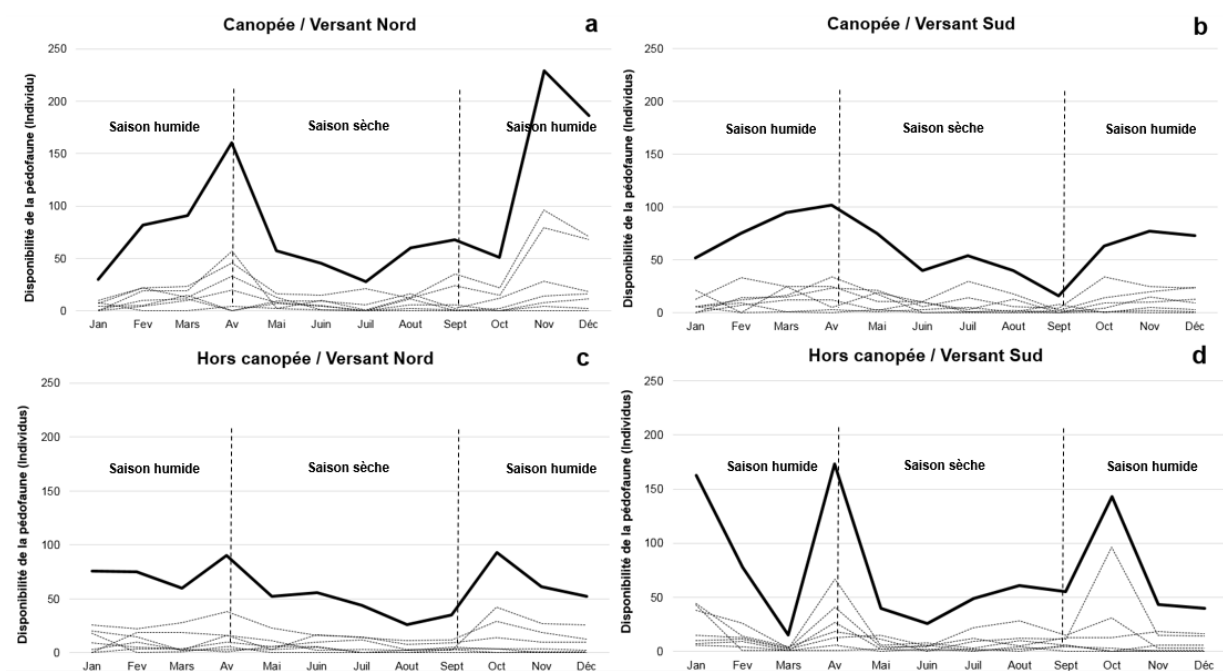


Figure 3.6 : Profil annuel de la méso et la macrofaune sous Cèdre de l'Atlas

Le modèle GLM appliqué à la disponibilité globale de la méso et la microfaune, montre des différences significatives pour l'effet saison. On peut préciser que la saison humide dépasse significativement la saison sèche en termes d'abondance (Fig. 3.7a). La zone canopée renferme les plus fortes abondances par rapport à la zone hors canopée ; toutefois, la différence n'est pas significativement différente

(Fig. 3.7b). La même remarque est signalée pour le facteur versant pour lequel, la probabilité ne montre pas une différence significative bien que le palier des abondances favorise le versant Nord par rapport au versant Sud (Fig. 3.7c).

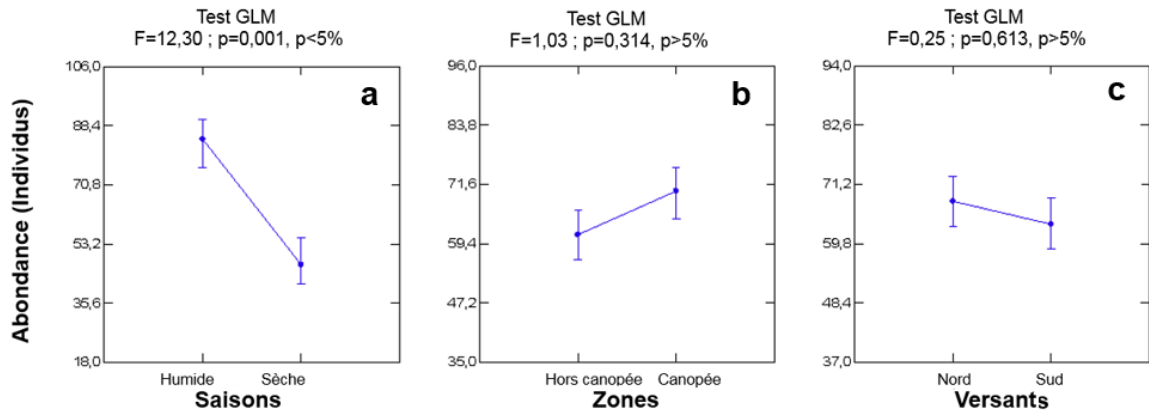


Figure 3.7 : Disponibilité comparée des peuplements de la méso et la macrofaune selon la saison, l'ouverture de la canopée et du versant

### 3.1.5. Structuration des peuplements pédofauniques

Le nombre de taxa enregistré est important, mais ne diffère pas significativement entre canopée et hors canopée dans les deux versants. Le nombre d'individus est très important, il est en faveur de la zone sous canopée dans le versant Nord. En revanche, dans le versant Sud, l'importance individuelle est en faveur de la zone hors canopée (Tableau 3.5).

Tableau 3.5 : Indices de structure des peuplements de nématodes

		Canopée	Hors canopée	Test Bootstrap (p)	Test Permutation (p)
Versant Nord	Taxa S	10	11	0,457 <sup>NS</sup>	0,498 <sup>NS</sup>
	Individus	3520	2664	0***	0***
	Indice de Shannon (H)	1,576	1,732	0***	0***
	$H_{max}$ (H')	3,33	3,46		
	Equitabilité (E)	0,483	0,513	0,417 <sup>NS</sup>	0,452 <sup>NS</sup>
Versant Sud	Taxa S	10	11	0,474	0,494
	Individus	3657	4040	0***	0***
	Indice de Shannon (H)	1,463	1,582	0***	0***
	$H_{max}$ (H')	3,33	3,46		
	Equitabilité (E)	0,432	0,442	0,655 <sup>NS</sup>	0,633 <sup>NS</sup>

NS : Non significative à 5%, \*\* : Significative à 1%, \*\*\* : Significative à 0,1%



Pour l'indice de diversité de Shannon, par référence aux valeurs de  $H_{max}$ , nous pouvons néanmoins observer une diversité faible ( $H < H'$ ). Au niveau des deux versants, les zones hors canopée diffèrent significativement par rapport aux zones canopée. Pour l'indice d'équitabilité, il affiche des valeurs similaires sur le plan versant et ouverture de la canopée ( $p < 5\%$  ; Tableau 3.5). Cette situation présente une tendance vers un équilibre entre espèces de nématodes (Tableau 3.5).

Le nombre de taxa de la méso et la microfaune est moins important par comparaison aux nématodes. Il ne diffère pas significativement entre canopée et hors canopée dans les deux versants. Le nombre d'individus est très important, il est en faveur de la zone sous canopée dans le versant Nord. En revanche, dans le versant Sud, l'importance individuelle est en faveur de la zone hors canopée (Tableau 3.6).

Pour l'indice de diversité de Shannon, par référence aux valeurs de  $H_{max}$ , nous pouvons toutefois observer une diversité faible ( $H < H'$ ). Au niveau des deux versants, les zones hors canopée diffèrent significativement par rapport aux zones canopée. Pour l'indice d'équitabilité, il affiche des valeurs similaires sur le plan versant et ouverture de la canopée ( $p < 5\%$  ; Tableau 3.6). Cette situation présente une tendance vers un équilibre entre espèces de mésofaune et macrofaune (Tableau 3.6).

Tableau 3.6 : Indices de structure des peuplements de méso et de macrofaune

		Canopée	Hors canopée	Test Bootstrap (p)	Test Permutation (p)
Versant Nord	Taxa S	7	7	1 <sup>NS</sup>	1 <sup>NS</sup>
	Individus	1087	720	0 <sup>***</sup>	0 <sup>***</sup>
	Indice de Shannon (H)	0,237	0,211	0,009 <sup>**</sup>	0,009 <sup>**</sup>
	$H_{max}$ (H')	1,628	1,697		
	Equitabilité E	0,727	0,779	0,029 <sup>*</sup>	0,022 <sup>*</sup>
Versant Sud	Taxa S	7	7	1 <sup>NS</sup>	1 <sup>NS</sup>
	Individus	762	886	0 <sup>***</sup>	0 <sup>***</sup>
	Indice de Shannon (H)	0,201	0,199	0,798 <sup>NS</sup>	0,795 <sup>NS</sup>
	$H_{max}$ (H')	1,732	1,725		
	Equitabilité (E)	0,807	0,801	0,787 <sup>NS</sup>	0,776 <sup>NS</sup>

### 3.1.6. Statut écologique des peuplements pédofauniques

Sur l'ensemble de 24 sorties, nous avons noté un effectif total de 13881 individus.

Tableau 3.7 : Indices de structure et statut écologique des peuplements de nématodes

<b>Canopée versant Nord</b>					
<b>Espèce</b>	<b>code</b>	<b>ni</b>	<b>F%</b>	<b>C%</b>	<b>Statut écologique</b>
<i>Tylenchus sp.</i>	Tyl	368	10,45	100	Omniprésente
<i>Helicoenchus sp.</i>	Helico	33	0,94	50	Régulière
<i>Ditylenchus sp.</i>	Dity	974	27,67	100	Omniprésente
<i>Aphelenchus sp.</i>	Aphes	41	1,16	41,67	Accessoire
<i>Aphelenchoides sp.</i>	Aphus	53	1,51	66,67	Régulière
<i>Dorylaimus sp.</i>	Dory	116	3,30	100	Omniprésente
<i>Eurydorilaimus sp.</i>	Eury	38	1,08	50	Régulière
<i>Ecuminicus sp.</i>	Ecum	114	3,24	100	Omniprésente
<i>Mononchus sp.</i>	Mono	257	7,30	100	Omniprésente
<i>Cephalobus sp.</i>	Cephal	1526	43,35	100	Omniprésente
<b>Canopée versant Sud</b>					
<b>Espèce</b>	<b>code</b>	<b>ni</b>	<b>F%</b>	<b>C%</b>	<b>Statut écologique</b>
<i>Tylenchus sp.</i>	Tyl	252	6,89	100	Omniprésente
<i>Helicoenchus sp.</i>	Helico	19	0,52	41,67	Accessoire
<i>Ditylenchus sp.</i>	Dity	911	24,91	100	Omniprésente
<i>Aphelenchus sp.</i>	Aphes	12	0,33	33,33	Accessoire
<i>Aphelenchoides sp.</i>	Aphus	10	0,27	33,33	Accessoire
<i>Dorylaimus sp.</i>	Dory	148	4,05	91,67	Constante
<i>Eurydorilaimus sp.</i>	Eury	68	1,86	50	Régulière
<i>Ecuminicus sp.</i>	Ecum	174	4,76	100	Omniprésente
<i>Mononchus sp.</i>	Mono	233	6,37	100	Omniprésente
<i>Cephalobus sp.</i>	Cephal	1830	50,04	100	Omniprésente
<b>Hors canopée versant Nord</b>					
<b>Espèce</b>	<b>code</b>	<b>ni</b>	<b>F%</b>	<b>C%</b>	<b>Statut écologique</b>
<i>Tylenchus sp.</i>	Tyl	236	8,86	100	Omniprésente
<i>Pratyenchus sp.</i>	Praty	2	0,08	8,33	Accidentelle
<i>Helicoenchus sp.</i>	Helico	32	1,20	50,00	Régulière
<i>Ditylenchus sp.</i>	Dity	639	23,99	100	Omniprésente
<i>Aphelenchus sp.</i>	Aphes	49	1,84	41,67	Accessoire
<i>Aphelenchoides sp.</i>	Aphus	14	0,53	66,67	Régulière
<i>Dorylaimus sp.</i>	Dory	156	5,86	100	Omniprésente
<i>Eurydorilaimus sp.</i>	Eury	57	2,14	66,67	Régulière
<i>Ecuminicus sp.</i>	Ecum	161	6,04	100	Omniprésente
<i>Mononchus sp.</i>	Mono	266	9,98	100	Omniprésente
<i>Cephalobus sp.</i>	Cephal	1052	39,49	100	Omniprésente
<b>Hors canopée versant Sud</b>					
<b>Espèce</b>	<b>code</b>	<b>ni</b>	<b>F%</b>	<b>C%</b>	<b>Statut écologique</b>
<i>Tylenchus sp.</i>	Tyl	392	9,70	100	Omniprésente
<i>Pratyenchus sp.</i>	Praty	2	0,05	16,67	Accidentelle
<i>Helicoenchus sp.</i>	Helico	19	0,47	75,00	Constante
<i>Ditylenchus sp.</i>	Dity	1238	30,64	100	Omniprésente
<i>Aphelenchus sp.</i>	Aphes	39	0,97	58,33	Régulière
<i>Aphelenchoides sp.</i>	Aphus	28	0,69	41,67	Accessoire
<i>Dorylaimus sp.</i>	Dory	229	5,67	100	Omniprésente
<i>Eurydorilaimus sp.</i>	Eury	50	1,24	50,00	Régulière
<i>Ecuminicus sp.</i>	Ecum	259	6,41	100	Omniprésente
<i>Mononchus sp.</i>	Mono	155	3,84	83,33	Constante
<i>Cephalobus sp.</i>	Cephal	1629	40,32	100	Omniprésente

Les fréquences d'occurrence maximale des différentes espèces sont présentées dans le tableau 3.7 ci-dessus. Les espèces possédant la fréquence d'abondance la plus importante sont *Ditylenchus sp.* et *Cephalobus sp.* au niveau des deux versants et en zones canopée et hors canopée. Plusieurs espèces présentent une fréquence un peu moins élevée, en dessous de 10 %, dont : *Tylenchus sp.*, *Pratylenchus sp.*, *Helicoenchus sp.*, *Aphelenchus sp.*, *Aphelenchoides sp.*, *Dorylaimus sp.*, *Eurydorilaimus sp.*, *Ecuminicus sp.* et *Mononchus sp.*

Le statut écologique des différentes espèces de nématodes (tableau 3.7), démontrent qu'il varie selon l'ouverture de la canopée et les versants. Ainsi, sous canopée et hors canopée au niveau du versant Nord, les espèces *Tylenchus sp.*, *Helicoenchus sp.*, *Ditylenchus sp.*, *Aphelenchoides sp.*, *Dorylaimus sp.*, *Eurydorilaimus sp.*, *Ecuminicus sp.*, *Mononchus sp.* et *Cephalobus sp.* appartiennent au même peuplement et acquièrent le statut d'espèces omniprésente-régulière. En revanche, *Aphelenchus sp.* ne fait pas partie du peuplement, mais participe à son fonctionnement. Elle est ainsi considérée comme espèce accessoire. Cependant, sous canopée au niveau du versant Sud, le peuplement subit un déséquilibre écologique ayant pour conséquence une modification du statut des espèces *Helicoenchus sp.* et *Aphelenchoides sp.* devenues accessoires par rapport au peuplement du versant Nord. En hors canopée, l'espèce *Aphelenchoides sp.* préserve son statut d'accessoire, alors que *Pratylenchus sp.* s'individualise par son statut d'espèce accidentelle.

L'examen du diagramme des Fréquences-Abondances de Fortuner et Merney fait ressortir 4 types de structurations qui varient en fonction du versant et de la canopée (Fig. 3.8).

Sous canopée, au niveau des versants Nord et Sud, trois types de structures sont distinguées où *Cephalobus sp.* est désignée « fréquent et abondant », *Ditylenchus sp.*, *Mononchus sp.* et *Tylenchus sp.* sont définies « peu fréquents et abondants ». Le reste du peuplement est considéré « peu fréquent et peu abondant » (Fig. 3.8a et b). Enfin, en hors canopée, le peuplement nématologique a tendance vers une structure de type « peu fréquent et peu abondant », exception faite pour *Cephalobus sp.* et *Ditylenchus sp.* qui sont de type « fréquent et peu abondant » (Fig. 3.8c et d).

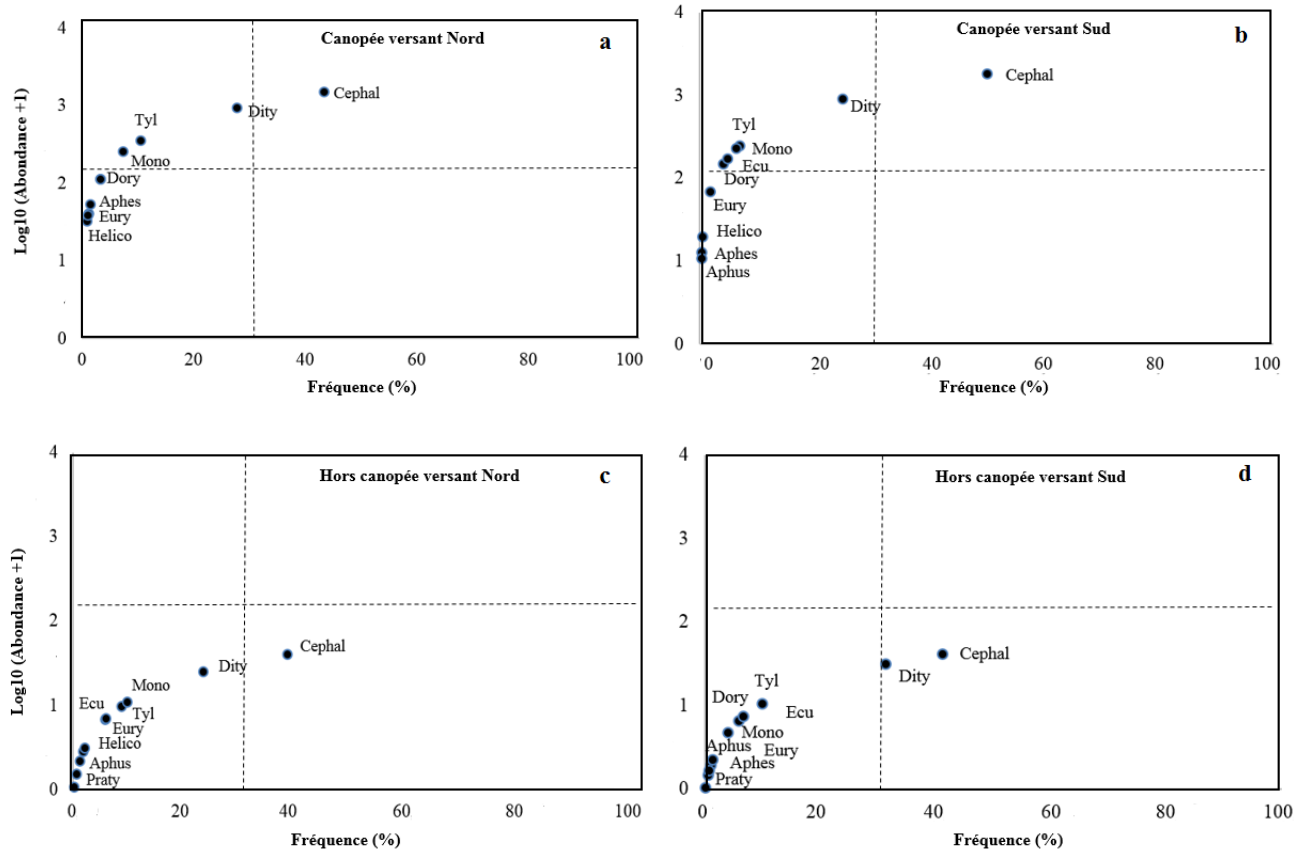


Figure 3.8 : Structure des peuplements de nématodes selon l'ouverture de la canopée et du versant

(Aph : Aphelenchus ; Aphl : Aphelenchoides ; Eury : Eurydorylaimus ; Dity : Ditylenchus Dory ; Dorylaimus ; Ecu : Ecuminicus ; Tyl : Tylenchus ; Prat : Pratylenchus ; Helico : Helicotylenchus ; Bact : Bactériovore ; Pred : Prédateur).

Concernant les peuplements de méso et macrofaune, nous avons enregistré un effectif total de 3455 d'individus. Les fréquences d'occurrence maximale des différents taxons sont présentées dans le tableau 3.8. Holistiquement, les espèces caractérisées par une fréquence d'abondance la plus importante sont *Lumbricus terrestris*, *Oribatida sp.*, *Gamasida sp.* et *Collembola sp.* au niveau des deux versants et en zones canopée et hors canopée. En dépit des taxons cités, les autres taxons présentent une fréquence un peu moins élevée de l'ordre de moins de 10%.

Sur le plan statut écologique des taxons de méso et macrofaune inventoriés, les résultats (tableau 3.8), illustrent l'existence d'une variation selon l'ouverture de la canopée et les versants. Ainsi, sous canopée au niveau des deux versants, les taxons : *Lumbricus terrestris.*, *Gamasida sp.*, *Collembola sp.*, et *Brachyiulus sp.* appartiennent au même peuplement et acquièrent le statut d'espèces constante.

En revanche, les *Oribatida sp.* disposent du statut d'espèce omniprésente (tableau 3.8).

Tableau 3.8 : Indices de structure et statut écologique des peuplements de méso et macrofaune

<b>Canopée versant Nord</b>					
<b>Taxons</b>	<b>Code</b>	<b>Ni</b>	<b>F%</b>	<b>C%</b>	<b>Statut écologique</b>
<i>Lumbricus terrestris</i>	Lom	111	10,21	83,33	Constante
<i>Brachyiulus sp.</i>	Bra	33	3,04	66,67	Régulière
<i>Geophilus sp.</i>	Geo	33	3,04	41,67	Accessoire
<i>Oribatida sp.</i>	Ori	351	32,29	100,00	Omniprésente
<i>Phytoseiida sp.</i>	Phy	90	8,28	75,00	Régulière
<i>Gamasida sp.</i>	Gam	345	31,74	91,67	Constante
<i>Collembola sp.</i>	Col	124	11,41	91,67	Constante
<b>Canopée versant Sud</b>					
<b>Taxons</b>	<b>Code</b>	<b>Ni</b>	<b>F%</b>	<b>C%</b>	<b>Statut écologique</b>
<i>Lumbricus terrestris</i>	Lom	117	15,35	83,33	Constante
<i>Brachyiulus sp.</i>	Bra	51	6,69	83,33	Constante
<i>Geophilus sp.</i>	Geo	22	2,89	50,00	Régulière
<i>Oribatida sp.</i>	Ori	226	29,66	100,00	Omniprésente
<i>Phytoseiida sp.</i>	Phy	48	6,30	75,00	Régulière
<i>Gamasida sp.</i>	Gam	185	24,28	91,67	Constante
<i>Collembola sp.</i>	Col	113	14,83	83,33	Constante
<b>Hors canopée versant Nord</b>					
<b>Taxons</b>	<b>Code</b>	<b>Ni</b>	<b>F%</b>	<b>C%</b>	<b>Statut écologique</b>
<i>Lumbricus terrestris</i>	Lom	86	11,94	100	Omniprésente
<i>Brachyiulus sp.</i>	Bra	28	3,89	33,33	Accessoire
<i>Geophilus sp.</i>	Geo	36	5,00	75,00	Régulière
<i>Oribatida sp.</i>	Ori	219	8,22	100	Omniprésente
<i>Phytoseiida sp.</i>	Phy	32	4,44	58,33	Régulière
<i>Gamasida sp.</i>	Gam	172	23,89	91,67	Constante
<i>Collembola sp.</i>	Col	147	20,42	100	Omniprésente
<b>Hors canopée versant Sud</b>					
<b>Taxons</b>	<b>Code</b>	<b>Ni</b>	<b>F%</b>	<b>C%</b>	<b>Statut écologique</b>
<i>Lumbricus terrestris</i>	Lom	143	16,14	92	Constante
<i>Brachyiulus sp.</i>	Bra	23	2,60	66,67	Régulière
<i>Geophilus sp.</i>	Geo	31	3,50	66,67	Régulière
<i>Oribatida sp.</i>	Ori	218	24,60	100	Omniprésente
<i>Phytoseiida sp.</i>	Phy	90	10,16	83,33	Constante
<i>Gamasida sp.</i>	Gam	248	27,99	91,67	Constante
<i>Collembola sp.</i>	Col	133	15,01	100	Omniprésente

Par ailleurs, en zone hors canopée au niveau des deux versants, nous signalons un nombre imposant de taxons à statut écologique d'espèces omniprésentes par

comparaison à la zone sous canopée. Elles sont représentées par les taxons *Lumbricus terrestris*, *Oribatida sp.* et *Collembola sp.*. Par contre, *Gamasida sp.* et *Phytoseiida sp.* sont affiliées au statut d'espèces constantes. Enfin, les *Geophilus sp.* et les *Phytoseiida sp.* par référence à leur valeur de la constance, sont désormais considérées comme taxons à statut régulier pour les zones et les versants (tableau 3.8).

### 3.2. Structuration des cascades trophiques

#### 3.2.1. Structure des cascades trophiques des peuplements de nématodes

Le diagramme rang fréquence établi sur la base des calculs des abondances transformées en logarithmes et le rang des espèces nous permet de visualiser l'homogénéité des peuplements de nématodes échantillonnés. Nous avons rapporté les richesses et les corrélations respectives ainsi que les probabilités associées à la comparaison des pentes des droites de Motomura dans le tableau 3.9. De manière globale, les fluctuations des peuplements fonctionnelles en cédraie durant l'année d'étude sont bien ajustées au modèle de Motomura. Les pentes des équations du modèle de Motomura sont négatives et très faibles pour l'ensemble des groupes trophiques ce qui correspond à une composition diversifiée et spécifique de chaque peuplement (canopée, hors canopée).

Tableau 3.9: Comparaison des pentes des peuplements des nématodes

	Canopée Nord	Canopée Sud	Hors canopée Nord	Hors canopée Sud
Pente a	-0,4384	-0,5594	-0,4974	-0,555
Taxa (n)	10	10	11	11
R	-0,971	-0,979	-0,969	-0,978
Ajustement Motomura	$2,78 \times 10^{-6}$	$7,18 \times 10^{-7}$	$8,72 \times 10^{-7}$	$1,71 \times 10^{-7}$
Canopée Nord	-			
Canopée Sud	0,8462 <sup>NS</sup>	-		
Hors canopée Nord	0,7591 <sup>NS</sup>	0,9139 <sup>NS</sup>	-	
Hors canopée Sud	0,9165 <sup>NS</sup>	0,9252 <sup>NS</sup>	0,7591 <sup>NS</sup>	-

Les diagrammes rang fréquence associés sont représentés dans les figures 9a, b, c et d. Les comparaisons des pentes des équations des courbes de tendance de ces fluctuations indiquent également des probabilités associées hautement

significatives montrant d'une part, la stabilité des peuplements et leurs différences de composition selon l'ouverture de la canopée et les versants.

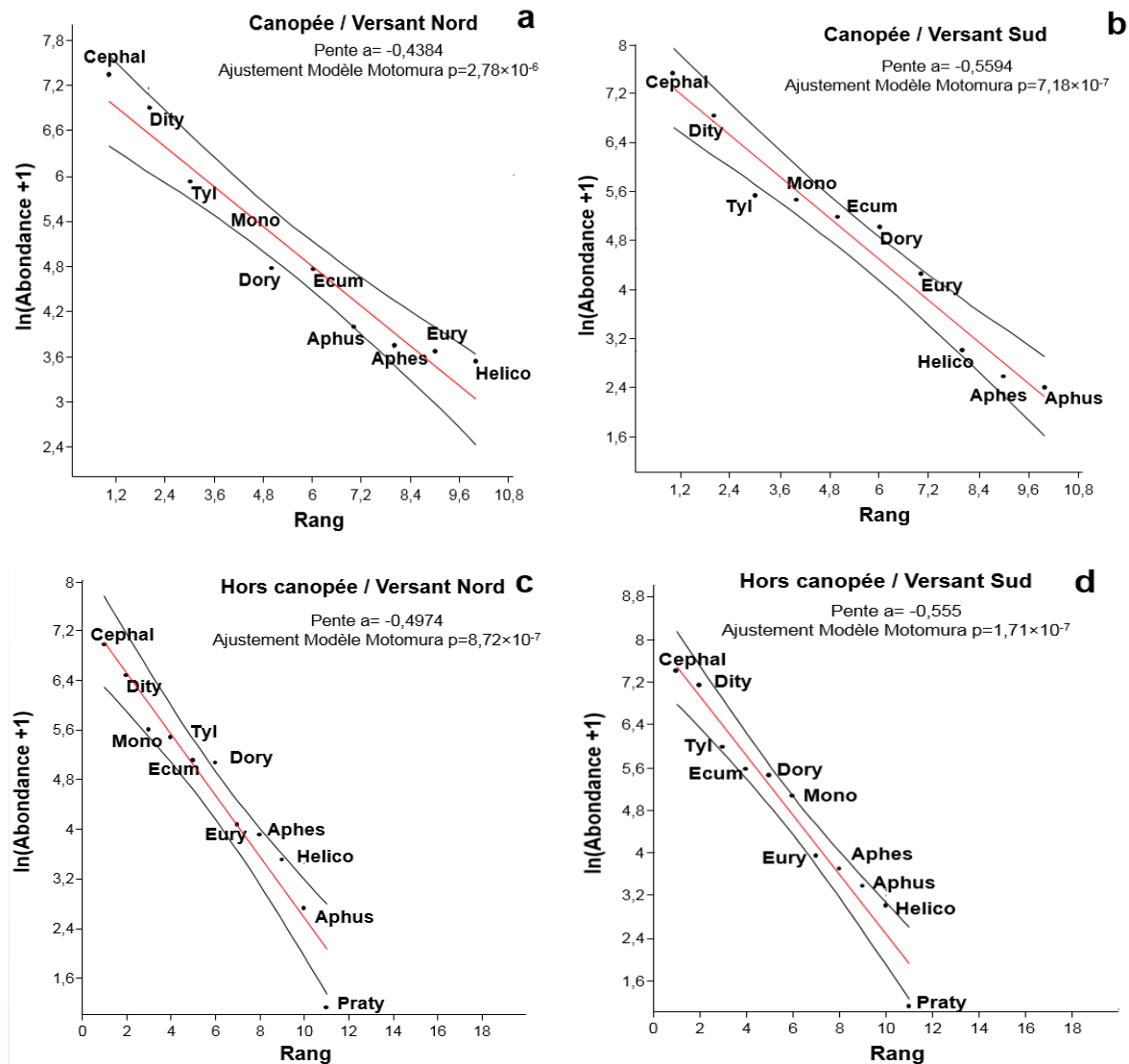


Figure 3.9 : Diagrammes rang-fréquence des communautés de nématodes de cédraie

(Aph : Aphelenchus ; Aphl : Aphelenchoides ; Eury : Eurydorylaimus ; Dity : Ditylenchus Dory : Dorylaimus ; Ecum : Ecuminicus ; Tyl : Tylenchus ; Prat : Pratylenchus ; Helico : Helicotylenchus).

### 3.2.2. Structure des cascades trophiques des peuplements de méso et macrofaune

Il est pertinent de considérer la chronologie de recrutement et d'arrivée des taxons nématologiques dans le sol de cédraie. Au sein des communautés trophiques respectives, l'ordre d'arrivée des espèces semble similaire ce qui peut être attribué à une arrivée des assemblages trophiques en cascade en relation avec différents

facteurs environnementaux notamment des facteurs liés à la disponibilité des proies et aliments et aux compétitions interspécifiques des guildes des taxons bénéfiques. Ainsi, chez les peuplements nématologiques, on observe une arrivée successive suivant un gradient décroissant *Cephalobus sp.* (Bactérovores) < *Ditylenchus sp.* (Fungivores) < *Tylenchus sp.* (Phytophages) < *Mononchus sp.* (Prédateurs) < *Dorylaimus sp.* (Omnivores) < *Ecuminicus sp.* (Omnivores).

Concernant la méso et la macrofaune, les fluctuations de leurs communautés sont en adéquation avec le modèle de Motomura. Comme les peuplements de nématodes, les pentes des équations du modèle de Motomura sont négatives et très faibles, alors que la comparaison des équations des courbes de tendance de ces fluctuations, indique des probabilités associées non significatives ( $p > 5\%$ ), pour l'ensemble des groupes trophiques ce qui correspond à une composition diversifiée et non spécifique (canopée, hors canopée) (Tableau 3.10).

Tableau 3.10: Comparaison des pentes des peuplements de méso et macrofaune

	Canopée Nord	Canopée Sud	Hors canopée Nord	Hors canopée Sud
Pente a	-0,4275	-0,3699	-0,3849	-0,4043
Taxa (n)	7	7	7	7
R	-0,966	-0,975	-0,97	-0,957
Ajustement Motomura	$3,80 \times 10^{-4}$	$1,79 \times 10^{-4}$	$2,85 \times 10^{-4}$	$7,02 \times 10^{-4}$
Canopée Nord	-			
Canopée Sud	0,4798 <sup>NS</sup>	-		
Hors canopée Nord	0,6974 <sup>NS</sup>	0,7478 <sup>NS</sup>	-	
Hors canopée Sud	0,8595 <sup>NS</sup>	0,3794 <sup>NS</sup>	0,5726 <sup>NS</sup>	-

A travers cette approche, nous avons essayé d'étudier la structuration des peuplements de méso et macrofaune inféodés aux différents biotopes par l'élaboration des 4 diagrammes rang/fréquences afin d'estimer l'ordre de recrutement écologique. Les diagrammes rang/fréquences des espèces sont tracés en classant les espèces par ordre de fréquence décroissante. Les rangs des espèces sont portés en abscisses et leurs fréquences en ordonnées avec une échelle logarithmique. Les diagrammes varient en fonction de l'abondance de chaque espèce qui permet de caractériser les distributions des différentes espèces (Fig. 3. 10).



Les résultats de cette analyse ont permis également de constater que l'ensemble des espèces semblent trouver leur biotope adéquat. Toutefois, il est à noter que l'ordre d'arrivée écologique des espèces se manifeste pareillement au niveau des zones prospectées (versants & positions), deux communautés se distinguent alors ; à savoir : (i) les espèces dominantes, dont la plupart acquièrent le statut trophique de phytosaprophages (*Oribatida sp.* (phytosaprophage), *Gamasida sp.* (prédateur), *Collembola sp.* (phytosaprophage) et *Lumbricus terrestris* (phytosaprophage)) ; (ii) les espèces marginales, principalement à statut trophique prédateurs (*Phytoseiida sp.* (prédateur), *Geophilus sp.* (prédateur) et *Brachyiulus sp.* (phytosaprophage)) (Fig. 3.10).

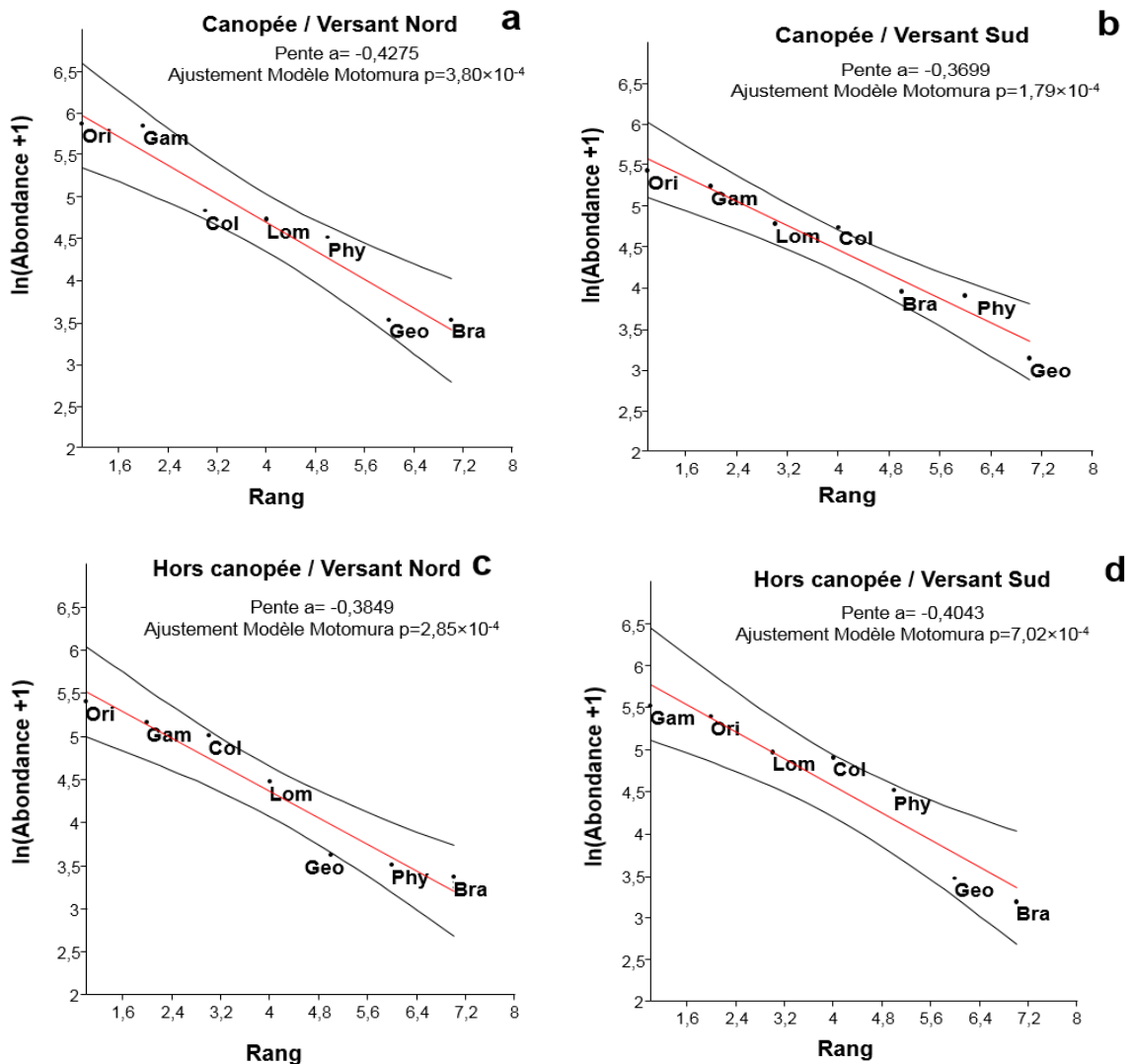


Figure 3.10 : Diagrammes rang-fréquence des communautés de la méso et la macrofaune de cédraie  
(Lom : Lumbricus, Bra : Brachyiulus, Geo : Geophilus, Ori : Oribatida, Phy : Phytoseiida, Gam : Gamasida, Col : Collembola)

### 3.2.3. Analyse des assemblages trophiques

Nous avons analysé la distribution et la composition des communautés sur la base d'une matrice globale établie à partir des données d'abondance temporelle des taxons pédofauniques répertoriés de 2015 à 2016 dans un sol sous cédraie exposées sur deux versants (Nord et Sud) au niveau du Parc National de Chréa. La matrice analysée représente au total 24 relevés et 16 genres. Sur la base de cette matrice, nous avons réalisé une analyse multivariée (DCA) par versant.

#### 3.2.3.1. Analyse globale des communautés du versant Nord

D'après la droite de troncature choisie (similitude a -2,4), le dendrogramme de la figure 3.11 et la DCA de la figure 3.12, mettent en évidence 2 assemblages saisonniers distincts.

L'assemblage de la saison humide se distingue globalement par une communauté essentiellement composée d'espèces Phytosaprophages et Fungivores : *Lumbricus terrestris* (Phytosaprophages), *Brachyiulus sp.* (Phytosaprophages), *Ditylenchus sp.* (Fungivores), *Aphelenchoides sp.* (Fungivores), *Oribatida sp.* (Phytosaprophages), *Collembola sp.* (Phytosaprophages), *Aphelenchus sp.* (Fungivores), et dans une moindre mesure d'espèces de prédateurs et de phytophages : *Phytoseiida sp.* (Prédateurs), *Gamasida sp.* (Prédateurs), *Mononchus sp.* (Prédateurs), *Geophilus sp.* (Prédateurs), *Dorylaimus sp.* (Omnivores), *Tylenchus sp.* (Phytophages), *Helicoenchus sp.* (Phytophages) (Fig. 3.11 et 12).

À la lecture, de la Classification Hiérarchique Ascendante (C.H.A.), sur la base d'une similarité de (-2), ladite saison humide, dévoile deux communautés. Celle du printemps, étalée sur les mois de janvier, février, mars, avril et mai. Elle renferme des nématodes phytophages (*Tylenchus sp.* et *Helicoenchus sp.*), des lombrics et myriapodes phytosaprophages (*Lumbricus terrestris* et *Brachyiulus sp.*), consolidés par des nématodes fungivores (*Ditylenchus sp.* et *Aphelenchoides sp.*). Cette communauté est équilibrée par la disponibilité de nématodes prédateurs (*Mononchus sp.* et *Geophilus sp.*) et omnivores (*Dorylaimus sp.*) (Fig. 3.11 et 12).

Cependant, la communauté d'hivers, qui coïncide avec les mois de novembre et décembre, elle abrite un nombre important d'acariens et de collemboles phytosaprophages (*Oribatida sp.* et *Collembola sp.*) associés à des nématodes fungivores (*Aphelenchus sp.*). Aussi, il faut noter la présence d'acariens prédateurs (*Phytoseiida sp.* et *Gamasida sp.*). (Fig. 3.11 et 12).

À propos de l'assemblage de la saison sèche, qui s'étale sur les mois de juin, juillet et août, il regroupe principalement des taxons de nématodes omnivores (*Eurydorilaimus sp.* et *Ecuminicus sp.*) et bactériovores (*Cephalobus sp.*) habituellement rencontrés dans la litière. Dans cet assemblage, la présence de nématodes phytophages (*Pratyenchus sp.*) est fréquente (Fig. 3.11 et 12).

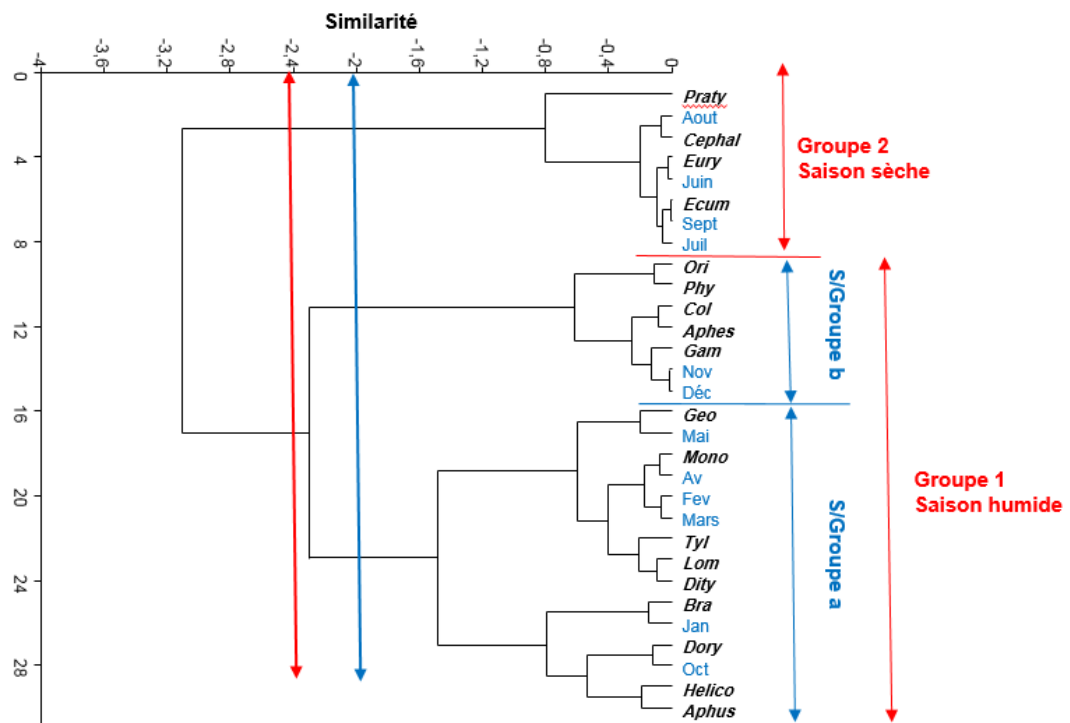


Figure 3.11 : Analyse C.H.A. des communautés saisonnières pédofaune sous cédraie (Versant Nord)

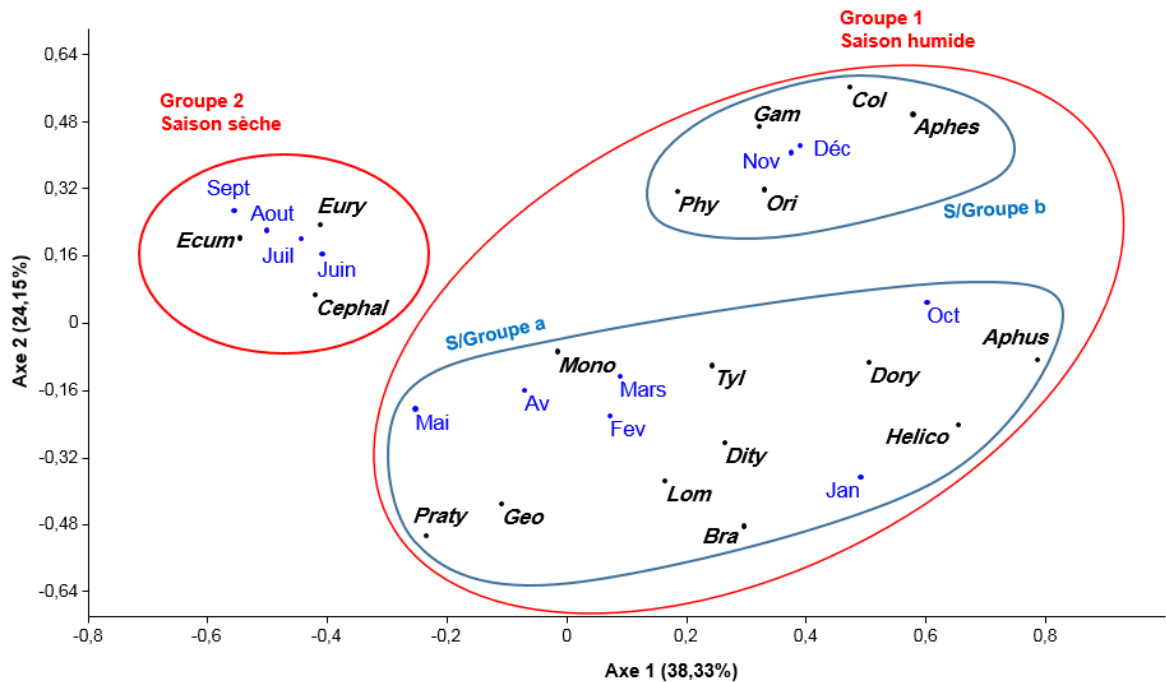


Figure 3.12 : Analyse par DCA des communautés saisonnières pédofaune sous cédraie (Versant Nord)

(Aph : Aphelenchus ; Aphl : Aphelenchoïdes ; Eury : Eurydorylaimus ; Dity : Ditylenchus Dory : Dorylaimus ; Ecum : Ecuminicus ; Tyl : Tylenchus ; Prat : Pratylenchus ; Helico : Helicotylenchus, Lom : Lumbricus, Bra : Brachyiulus, Geo : Geophilus, Ori : Oribatida, Phy : Phytoseiida, Gam : Gamasida, Col : Collembola).

### 3.2.3.2. Analyse globale des communautés du versant Sud

Les résultats obtenus par la C.H.A. (similarité -2), montrent la présence de deux pools d'espèces. Le pool d'hivers, confiné à la période de décembre, janvier et février, qui rassemble divers groupes trophiques, principalement ceux qui caractérisent les cascades trophiques d'une litière. On y rencontre, les phytophages (*Tylenchus sp.* et *Helicoenchus sp.*), les phytosaprophages (*Oribatida sp.* et *Brachyiulus sp.*), les fungivores (*Ditylenchus sp.*, *Aphelenchoïdes sp.* et *Aphelenchus sp.*) et les prédateurs (*Geophilus sp.*, *Phytoseiida sp.* et *Gamasida sp.*) (Fig. 3.13 et 14). En revanche, le pool a saisonnal, s'apparente à une période très longue (de mars à novembre), il reproduit la même cascade trophique du début de la saison mais avec différents taxons. Nous signalons les phytophages (*Pratylenchus sp.*), les phytosaprophages (*Lumbricus terrestris* et *Collembola sp.*), les bactérivores (*Cephalobus sp.*), les prédateurs (*Mononchus sp.*) et omnivores (*Dorylaimus sp.*, *Eurydorilaimus sp.* et *Ecuminicus sp.*) (Fig. 3.13 et 14).

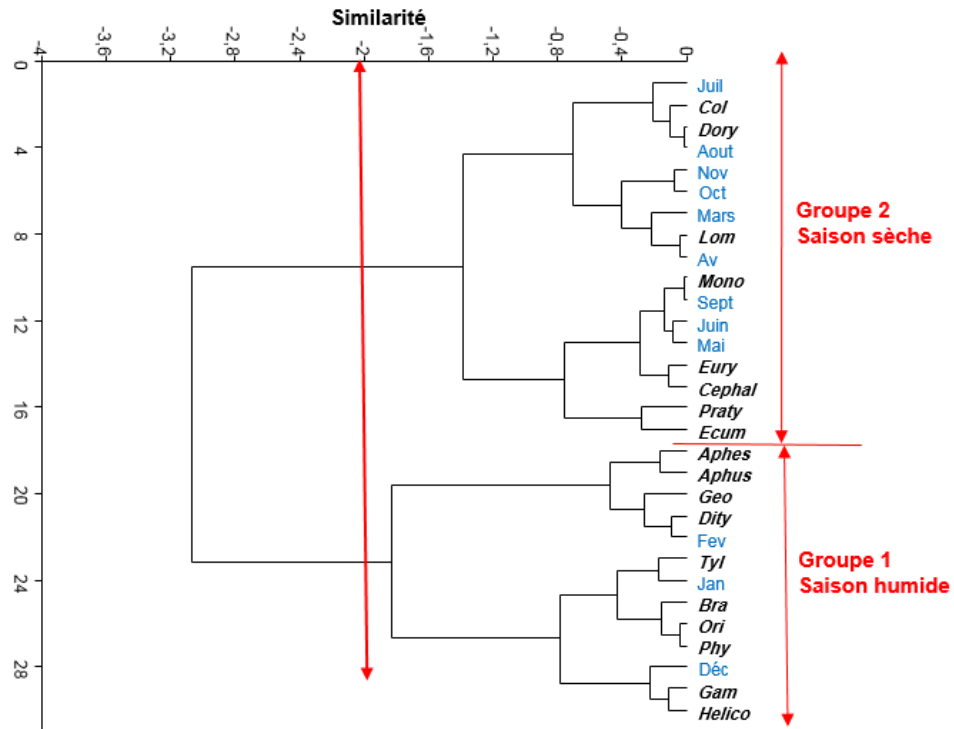


Figure 3.13 : Analyse C.H.A. des communautés saisonnières pédofaune sous cédraie (Versant Sud)

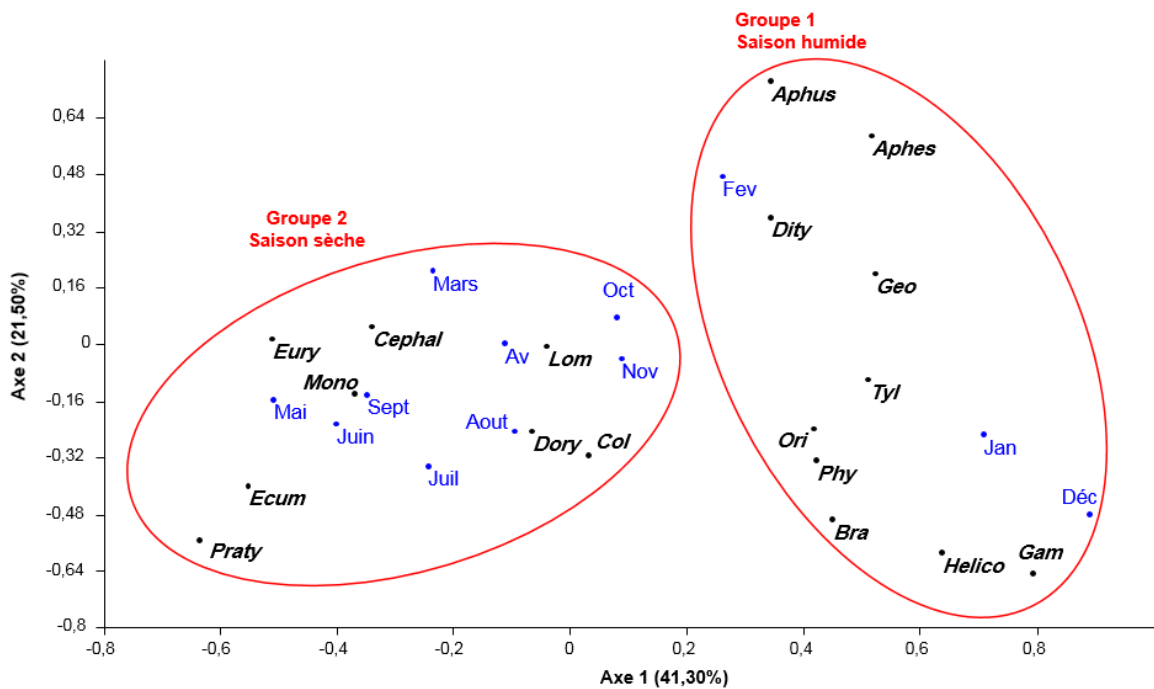


Figure 3.14 : Analyse par DCA des communautés saisonnières pédofaune sous cédraie (Versant Sud)

(Aph : Aphelenchus ; Aphl : Aphelenchoides ; Eury : Eurydorylaimus ; Dity : Ditylenchus Dory : Dorylaimus ; Ecum : Ecuminicus ; Tyl : Tylenchus ; Prat : Pratylenchus ; Helico : Helicotylenchus, Lom : Lumbricus, Bra : Brachyiulus, Geo : Geophilus, Ori : Oribatida, Phy : Phytoseiida, Gam : Gamasida, Col : Collembola).

### 3.3. Les relations entre la fertilité biologique du sol et l'expression végétative et phytochimique du cèdre de l'atlas.

#### 3.3.1. Variation quantitative de la granulométrie du sol sous cédraie selon les versants

Nous avons comparé durant nos investigations, les variations quantitatives des granulats (argile, limon et sable) constituant les horizons (H1, H2 et H3) du sol sous cédraie des deux versants (Nord et Sud) par une analyse de la variance à un seul facteur (One way ANOVA). Les analyses granulométriques ont été mesurées à partir d'un mélange des différents horizons (H1+H2+H3) prélevés de janvier à décembre 2016.

Le test One way ANOVA, indique que la teneur moyenne en argile au niveau du versant Nord est significativement plus élevée qu'au niveau du versant Sud même si les valeurs moyennes sont parfois très proches (Fig. 3.15).

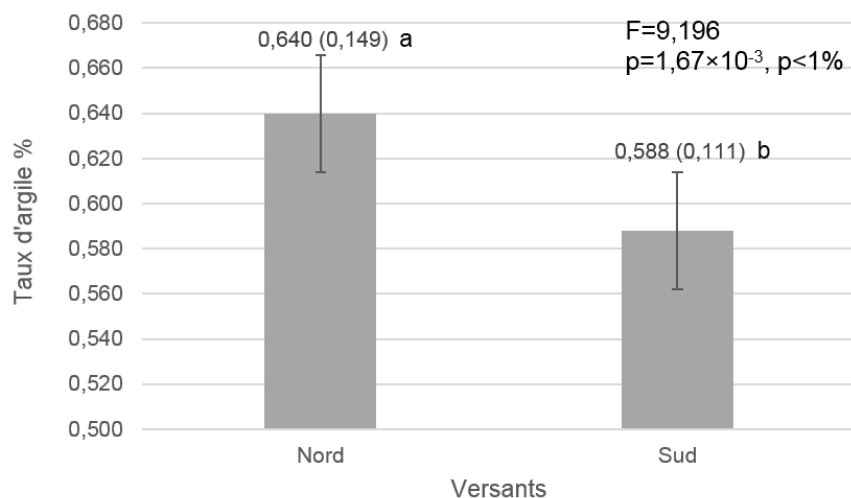


Figure 3.15 : Evaluation quantitative du taux d'argile en fonction des versants

Les résultats ont montré aussi que le taux de limon fin est disponible au niveau du versant Nord de manière très hautement significative (Fig. 3.16a).

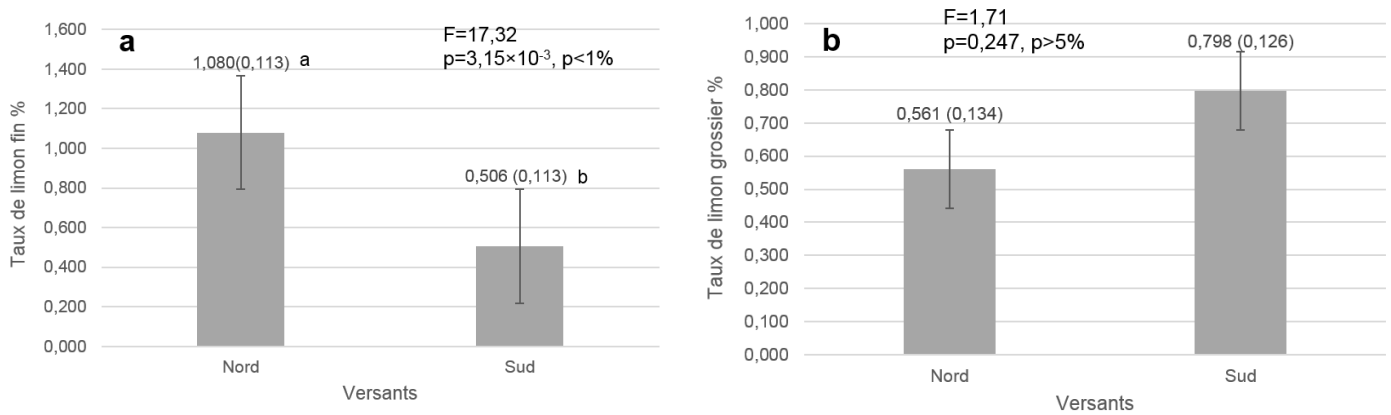


Figure 3.16 : Evaluation quantitative du taux de limon en fonction des versants

A l'opposé, le versant Sud présente un taux plus élevé en limon grossier (Fig. 3.16b). Une augmentation significative des taux de sable fin et grossier a également été observée au profit du versant Sud par rapport au versant Nord (Fig. 3.17a et b).

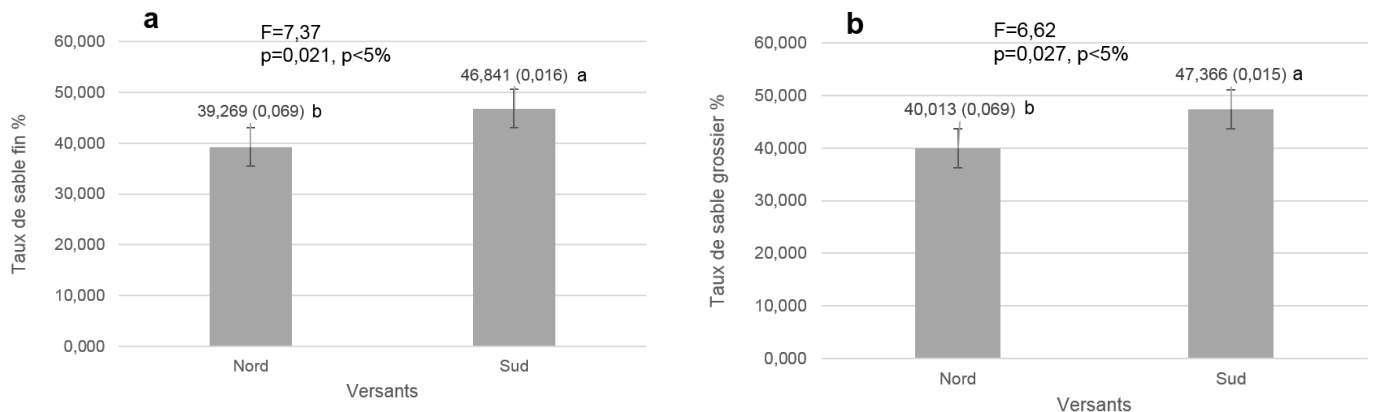


Figure 3.17 : Evaluation quantitative du taux de sable en fonction des versants

### 3.3.2. Variation quantitative de la chimie du sol sous cédraie selon les saisons et les versants

La présentation figure en BoxPlot des données expérimentales est avancée dans le but d'apprécier la variation du pH observée sous l'effet de la variation saisonnière au niveau des deux versants (Fig. 3.18). La comparaison du pH enregistré annonce une similarité des valeurs entre saisons et versants. Globalement, suivant les valeurs du Q1 et Q3, le pH sous cèdre varie entre 6,52 (Fig. 3.18a) et 7,35 (Fig. 3.18b).

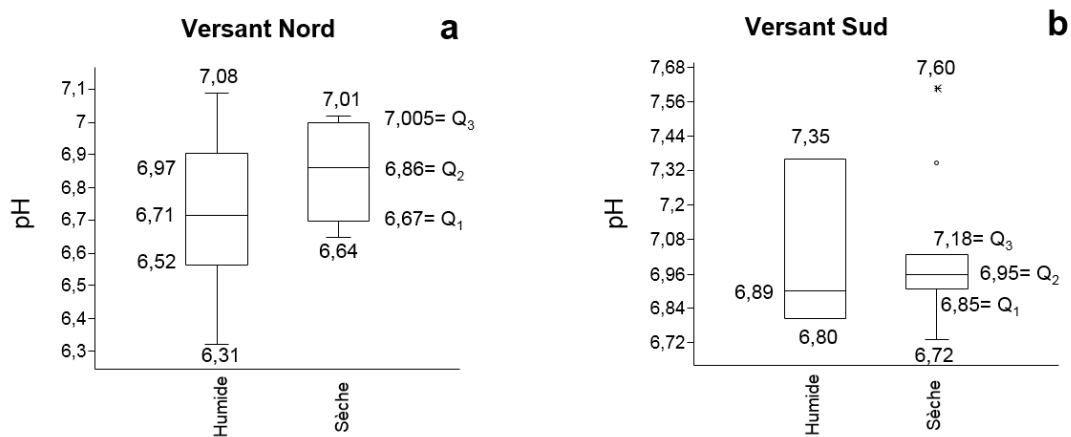


Figure 3.18 : Analyse des variations du pH en fonction des versants et des saisons

La comparaison des valeurs globales du pH des deux versants du parc pour chaque saison humide et sèche est présentée sur la figure 3.19. Le Test One way ANOVA, indique l'absence de différence significative entre les valeurs du pH enregistrées par référence aux probabilités associées ( $p > 5\%$ ). Cet état indique que le sol est légèrement acide avec un pH variant entre 6 et 7 (Fig. 3.19a et b).

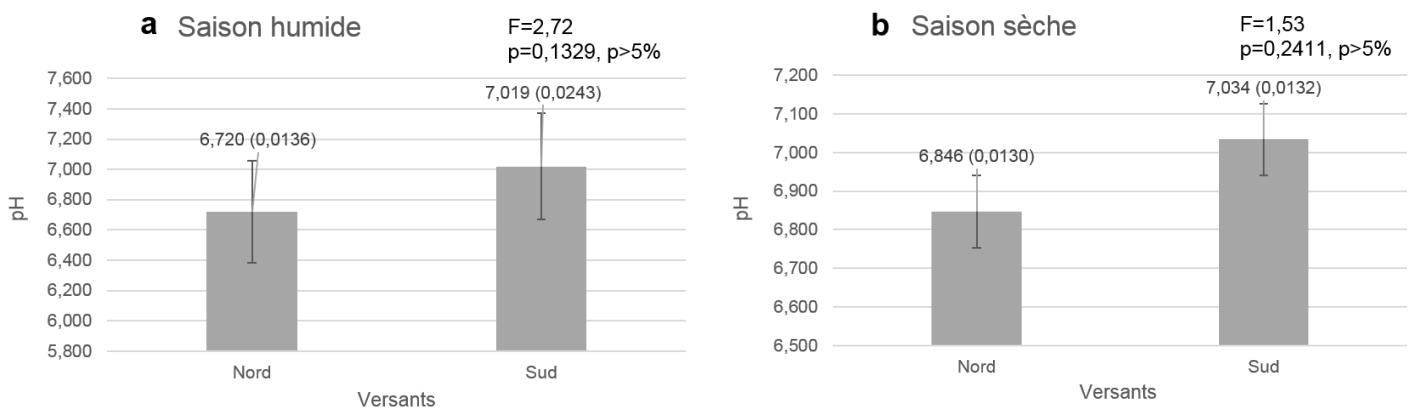


Figure 3.19 : Evaluation quantitative du pH en fonction des versants et des saisons

Les taux de la matière organique mesurés pendant la saison humide et la saison sèche au niveau des versants Nord et Sud, indiquent une fluctuation comprise entre  $Q1=11,94$  (Fig. 3.20b) et  $Q3=14,12$  (Fig. 3.20a).



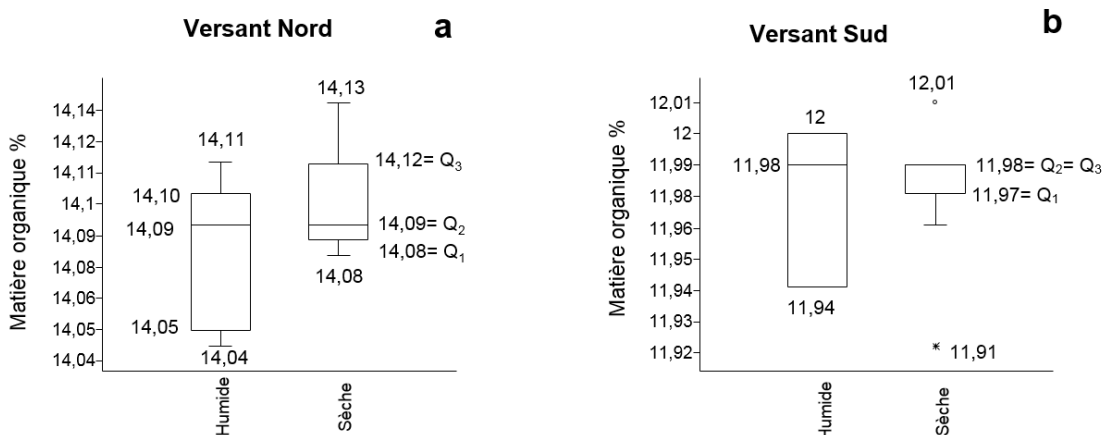


Figure 3.20 : Analyse des variations de la matière organique en fonction des versants et des saisons

Durant les deux saisons, les teneurs en matière organique au niveau du versant Nord, sont significativement plus importantes que celles enregistrées au niveau du versant Sud (Test On way ANOVA,  $p < 0,01\%$ ) (Fig. 3.21a et b).

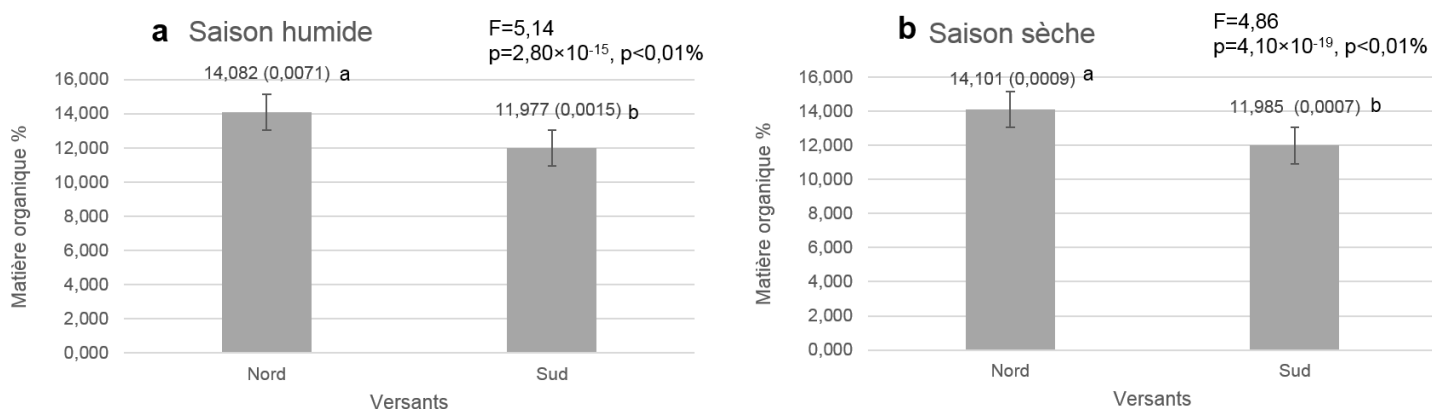


Figure 3.21 : Evaluation quantitative de la matière organique en fonction des versants et des saisons

### 3.3.3. Variation quantitative de l'expression végétative et de la phytochimie du cèdre selon les saisons et les versants

Les différentes comparaisons entre l'expression végétative, l'activité photosynthétique et l'expression biochimique des aiguilles du cèdre exprimées

durant les saisons humide et sèche au niveau des versants sont illustrées dans le tableau 3.11.

Au niveau du versant Nord, les teneurs des paramètres végétatif et biochimique durant la saison humide (N.S.H.) sont significativement exprimées par rapport à la saison sèche (N.S.S.) (Test One way ANOVA,  $p < 5\%$ ). Les mêmes constatations sont signalées au niveau du versant Sud où le cèdre exprime une activité très importante durant la saison humide en termes de production de phytomasse et d'activité phytochimique (S.S.H.>S.S.S.).

En ce qui concerne les comparaisons croisées (même saison sur deux versants), la saison humide du versant Nord (N.S.H.) est significativement plus importante en matière de productivité par comparaison à la saison humide du versant Sud (S.S.H.). Par ailleurs, des comparaisons non significatives ont été obtenues durant la saison sèche au niveau du versant Sud. Celles-ci, demeurent assez faibles par rapport aux expressions du cèdre durant la saison humide sur les deux versants.

Tableau 3.11: Analyse de l'expression de la production de la phytomasse et de l'activité phytochimique du cèdre de l'Atlas sous l'effet des saisons et des versants

	Expression végétative			Activité photosynthétique				Expression biochimique						
	N. Tf	P.F.	P.S.	Chl. A	Chl. b	CHL.T.	Car.	A.A.	Prol.	Suc-sol-T.	Prot-Hyd-Sol	Prot-Sol	C. Phénol.	T. Cendre
<b>N.S.H.</b>	16,49 (0,027)	5,77(0,058)	3,49(0,066)	19,47(0,072)	20,17(0,025)	39,64(0,040)	4,82(0,184)	490,40(0,144)	79,75(0,172)	0,85(0,116)	80,52(0,150)	92,00(0,074)	0,44(0,153)	0,81(0,079)
<b>N.S.S.</b>	12,56(0,056)	3,53(0,079)	1,74(0,106)	15,72(0,035)	14,31(0,085)	30,03(0,025)	2,33(0,178)	294,19(0,036)	29,38(0,104)	0,59(0,028)	69,14(0,017)	63,65(0,050)	0,19(0,076)	0,34 (0,108)
<b>F</b>	<b>22,17</b>	<b>38,47</b>	<b>10,52</b>	<b>11,24</b>	<b>34,11</b>	<b>7,87</b>	<b>8,66</b>	<b>86,70</b>	<b>40,27</b>	<b>4,21</b>	<b>16,24</b>	<b>24,22</b>	<b>6,62</b>	<b>18,96</b>
<b>p</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,001**</b>	<b>0,001**</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,002**</b>	<b>0,004**</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,001**</b>	<b>0,001**</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,001**</b>	<b>0,001**</b>
<b>S.S.H.</b>	14,89(0,045)	3,81(0,058)	2,63(0,036)	14,62(0,127)	17,66(0,122)	32,28(0,149)	2,97(0,139)	249,47(0,026)	37,31(0,072)	0,58(0,036)	80,72(0,030)	68,91(0,019)	0,14(0,080)	0,43(0,063)
<b>S.S.S.</b>	12,16(0,028)	2,04(0,088)	1,11(0,099)	12,64(0,053)	12,02(0,057)	24,66(0,032)	1,43(0,099)	189,00(0,093)	21,11(0,079)	0,51(0,064)	54,96(0,103)	51,63(0,120)	0,13(0,086)	0,29(0,096)
<b>F</b>	<b>6,15</b>	<b>8,30</b>	<b>5,14</b>	<b>6,39</b>	<b>11,07</b>	<b>42,88</b>	<b>8,05</b>	<b>67,17</b>	<b>13,39</b>	<b>5,54</b>	<b>21,13</b>	<b>10,07</b>	<b>1,688</b>	<b>6,90</b>
<b>p</b>	<b>0,003**</b>	<b>0,007**</b>	<b>0,001**</b>	<b>0,003**</b>	<b>0,001**</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,005**</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,001**</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,002**</b>	<b>0,241<sup>NS</sup></b>	<b>0,007**</b>
<b>N.S.H.</b>	16,49 (0,027)	5,77(0,058)	3,49(0,066)	19,47(0,072)	20,17(0,025)	39,64(0,040)	4,82(0,184)	490,40(0,144)	79,75(0,172)	0,85(0,116)	80,52(0,150)	92,00(0,074)	0,44(0,153)	0,81(0,079)
<b>S.S.H.</b>	14,89(0,045)	3,81(0,058)	2,63(0,036)	14,62(0,127)	17,66(0,122)	32,28(0,149)	2,97(0,139)	249,47(0,026)	37,31(0,072)	0,58(0,036)	80,72(0,030)	68,91(0,019)	0,14(0,080)	0,43(0,063)
<b>F</b>	<b>77,02</b>	<b>43,89</b>	<b>5,25</b>	<b>19,21</b>	<b>5,57</b>	<b>13,13</b>	<b>9,15</b>	<b>65,502</b>	<b>41,89</b>	<b>5,55</b>	<b>1,210</b>	<b>26,87</b>	<b>14,83</b>	<b>26,15</b>
<b>p</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,022*</b>	<b>0,001**</b>	<b>0,006*</b>	<b>0,001**</b>	<b>0,002**</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,014*</b>	<b>0,204<sup>NS</sup></b>	<b>0,000***</b>	<b>0,001**</b>	<b>0,000***</b>
<b>N.S.S.</b>	12,56(0,056)	3,53(0,079)	1,74(0,106)	15,72(0,035)	14,31(0,085)	30,03(0,025)	2,33(0,178)	294,19(0,036)	29,38(0,104)	0,59(0,028)	69,14(0,017)	63,65(0,050)	0,19(0,076)	0,34 (0,108)
<b>S.S.S.</b>	12,16(0,028)	2,04(0,088)	1,11(0,099)	12,64(0,053)	12,02(0,057)	24,66(0,032)	1,43(0,099)	189,00(0,093)	21,11(0,079)	0,51(0,064)	54,96(0,103)	51,63(0,120)	0,13(0,086)	0,29(0,096)
<b>F</b>	<b>1,89</b>	<b>1,42</b>	<b>4,33</b>	<b>7,77</b>	<b>5,96</b>	<b>11,25</b>	<b>5,08</b>	<b>32,89</b>	<b>11,82</b>	<b>2,33</b>	<b>8,27</b>	<b>5,96</b>	<b>1,25</b>	<b>2,03</b>
<b>p</b>	<b>0,125<sup>NS</sup></b>	<b>0,220<sup>NS</sup></b>	<b>0,027*</b>	<b>0,012*</b>	<b>0,018*</b>	<b>0,001**</b>	<b>0,005**</b>	<b>0,000***</b>	<b>0,001**</b>	<b>0,127<sup>NS</sup></b>	<b>0,002**</b>	<b>0,015*</b>	<b>0,223<sup>NS</sup></b>	<b>0,275<sup>NS</sup></b>

N.S.H. : Nord saison humide, N.S.S. : Nord saison sèche, S.S.H. : Sud saison humide, S.S.S. : Sud saison sèche

N.Tf : Nombre de touffes, P.F. : Poids frais, P.S. : Poids sec, Chl. a : Chlorophylle a, Chl. b : Chlorophylle b, Chl. T. : Chlorophylle totale, Car. : Caroténoïdes, Prol. : Proline. Suc-sol-T. : Sucres solubles totaux, Prot-Hyd-Sol : Protéines hydrosolubles, Prot-Sol : Protéines solubles, C. Phénol. : Composés polyphénoliques, T. Cendre : Taux de cendre

NS : Non significative, \* : Significative à 5%, \*\* : Significative à 1%, \*\*\* : Significative à 0,1%

#### 3.3.4. Interaction des paramètres biotiques et abiotiques sous cédraie

Nous avons cherché à savoir si la production de la phytomasse et de l'activité phytochimique du Cèdre de l'Atlas pendant l'alternance des saisons humide et sèche étaient influencées par les réseaux trophiques (fertilité biologique des sols) de la pédofaune au niveau des deux versants du Parc National de Chréa. Une analyse multivariée en composante principale (A.C.P.) portant sur la granulométrie et la chimie du sol sous cèdre, les taxons formant les communautés pédofauniques, l'expression végétative, l'activité photosynthétique et l'expression biochimique des aiguilles du cèdre a donc été effectuée.

Pour des raisons purement pratiques, nous avons considéré seulement la méso et macrofaune dans la structuration des réseaux trophiques du faite que les représentants de ces deux catégories interviennent essentiellement dans la dégradation de la matière végétale ; par comparaison, aux communautés de nématodes qui participent activement dans la stabilité des agrégats de l'humus. À l'aide du test du cercle de corrélation de 95%, nous avons identifié les variables dont les corrélations sont très fortes. Les projections ont montré que le peuplement des Lombrics s'accorde une position hors cercle (Fig. 3.22a), son élimination de la matrice globale, nous permettra d'avoir une lecture très affinée des données du terrain (Fig. 3.22b).

L'analyse en composantes principales (A.C.P.), effectuée avec le logiciel PAST, à partir des valeurs des variables biotiques du sol sous cèdre, les variables abiotiques du Cèdre de l'Atlas et les cascades trophiques est satisfaisante pour le paramètre causalité dans la mesure où plus de 80% de la variance est exprimée sur les deux premiers axes (Fig. 3.23).

La projection des valeurs des différents paramètres sur le premier axe 1 (98,57 %), montre une interdépendance entre les facteurs étudiés (Fig. 3.23).

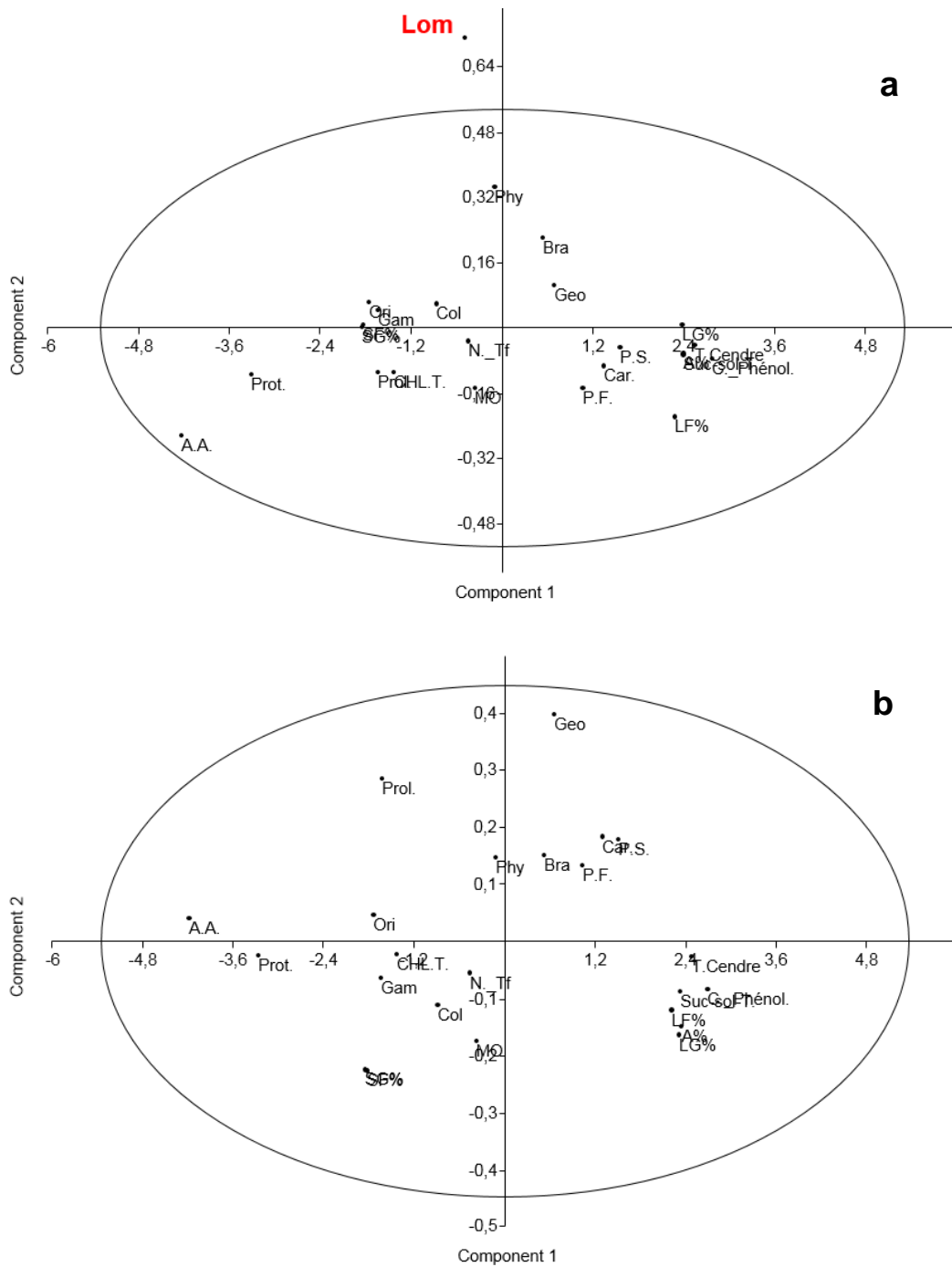


Figure 3.22 : Projection des paramètres biotiques et abiotiques de la cédraie sur le cercle de corrélation

La projection des vecteurs montre que la saisonnalité impact d'une manière très significative les cascades trophiques et par conséquent la productivité du cèdre si elle est comparée aux versants (S.S.H. & N.S.H. ; N.S.S. & S.S.S). L'analyse A.C.P., fait montrer que les paramètres en opposés des vecteurs expriment un statut à saisonnier (a seasonal). Sur le plan fonctionnalité, le phytosaprophage *Brachyulus sp.* (Bra) et le prédateur *Geophilus sp.* (Geo) sont très abondants dans un sol riche en argile (A%) et en limon (LF% & LG%). Leur disponibilité dans de telles conditions, permet au cèdre d'exprimer une meilleure production de phytomasse (P.S. & P.F.). Doté d'une quantité très importante de caroténoïdes (Car), elle renforce la collecte de la lumière solaire puis transmet l'énergie lumineuse à la chlorophylle. L'activation photosynthétique sera soldée par une production de métabolites primaires (sucres solubles totaux), des métabolites secondaires (composés phénoliques) et enfin une meilleur séquestration des éléments minéraux (Taux de cendre) (Fig. 3.23).

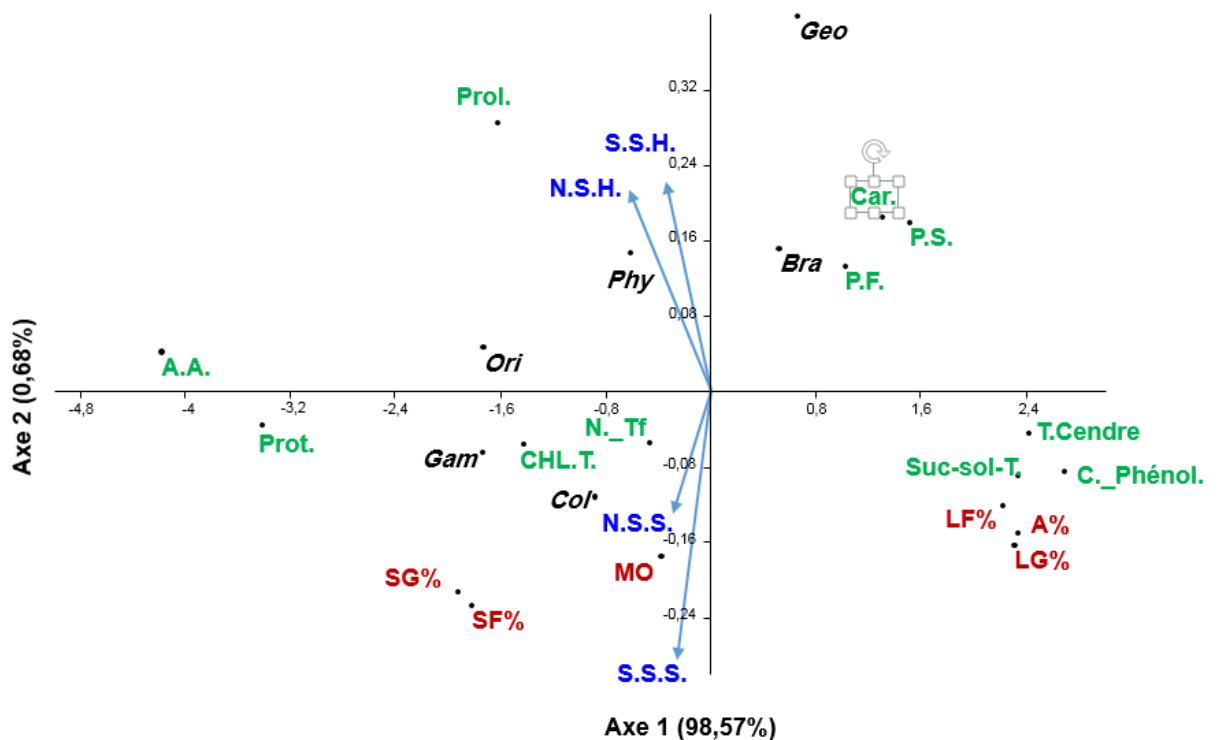


Figure 3.23 : Projection des paramètres biotiques et abiotiques de la cédraie sur les deux axes de l'ACP

*A contrario*, pareillement, en saison humide ou en saison sèche, les paramètres projetés dans le sens des vecteurs, signifient l'installation d'une cascade trophique autre que celle signalée en hors saison. Elle renferme les phytosaprophages *Oribatida sp.* (Ori) et *Collembola sp.* (Col) ainsi que les prédateurs Phytoseiida sp. (Phy) et Gamasida sp.(Gam). Ce réseau trophique évolue dans un sol riche en matière organique (MO) et très aéré (SF% & SG%). Dans de pareilles conditions, le cèdre entreprend son activité photosynthétique (Plus de Chlorophylle totale), qui conduira à une forte production de jeunes pousses (nombre important de touffes d'aiguilles). Sur le plan physiologique, l'expression des métabolites primaires notamment les acides aminés (A.A.) et les protéines (Prot) est maximale. Cette activité est supportée par une production intense de la proline (osmorégulateur). Outre son rôle dans le métabolisme primaire en tant que constituant des protéines, la proline est l'un des solutés compatibles le plus fréquemment accumulé en réponse à des contraintes environnementales variées et joue un rôle important dans la tolérance des plantes (Fig. 3.23).

## CHAPITRE 4

### DISCUSSION

En montagne, l'effet de l'altitude et de l'exposition entraîne une fluctuation importante des conditions climatiques sur des superficies restreintes [158]. De même, l'histoire géologique mouvementée des massifs montagneux, la diversité des substratums et des reliefs influencent fortement la formation et la diversité des sols en place [159]. Dans ce sens, les écosystèmes de montagne présentent, à l'échelle du massif, voire de la vallée, un contraste important des conditions écologiques pouvant influencer la répartition des espèces. Bien que le plan d'échantillonnage utilisé dans le cadre de cette thèse ait été construit de manière à limiter au maximum les variations des conditions écologiques entre les deux facteurs étudiés, il existe une variabilité au sein même des types de peuplements définis, qu'il est intéressant de considérer pour caractériser de manière plus fine les patrons de répartition des espèces.

Notre étude se base sur : i) Inventaire de la pédofaune : microfaune (nématodes), la mésofaune (Acariens et Collembolés) et la macrofaune (Lombrics et Myriapodes). ii) Analyse physico-chimique du sol (Granulométrie, pH et matière organique), des trois profils pédologiques (H1, H2 et H3). iii) Évaluation de l'expression végétative (Nombre de touffes, poids frais et poids sec), évaluation de l'expression photosynthétique (mesure de la chlorophylle A, B, totale et caroténoïde) et l'évaluation de l'activité phytochimique (quantification de la proline, sucres totaux, protéines solubles et hydrosolubles, teneur en cendre et les polyphénols) au niveau des versants Nord et Sud sous et hors canopée au niveau d'un site expérimentale, que nous avons identifié, de la cédraie du Parc National de Chréa.

Très peu de recherches ont abordé le sujet que nous traitons, induisant une faible disponibilité de références pour comparer les résultats et leurs interprétations. A ce sujet, Coyle et *al.* [160] indique que la faune du sol, bien que largement reconnue comme un moteur important de la fonction biogéochimique, de la structure et de la durabilité du sol et des interactions trophiques, est sous-étudiée par rapport à



d'autres organismes souterrains tels que les archées, les bactéries et les champignons.

Ce chapitre traite d'interactions causes à effets des différents facteurs et paramètres observés, estimés et mesurés, dont les résultats sont consultables au chapitre trois de ce travail. La discussion et les interprétations tentent de focaliser sur les interactions facteurs biotiques – abiotiques de façon spécifique et biocénose – écosystème (biotope).

#### 4.1. Importance des interactions pédofaune – facteurs du biotope de la cédraie

##### 4.1.1 Importance de la disponibilité de la pédofaune par rapport à l'exposition

L'effet exposition est très peu pris en compte dans la littérature scientifique, en dépit des importants effets et interactions biotopes-biocénoses bien connus, notamment par rapport aux paramètres abiotiques du milieu (humidité, luminosité...). Les taxons de la microfaune *Helicotylenchus*, *Ditylenchus*, *Aphelenchoides*, *Aphelencoides* et *Monochus* caractérisent le versant Nord, tandis que le versant Sud enregistre une présence plus abondante de *Tylenchus*, *Dorylaimus*, *Eurydorilaimus*, *Ecuminus* et *Cephalobus*. En ce qui concerne les taxons de la mésofaune et la macrofaune, les *Geophilidae*, *Oribatidae*, *Gamasidae* et Collemboles sont les plus abondantes sur le versant Nord en termes d'effectifs alors que les *Lumbricidae*, *Iulidae* et *Phytoseiidae* sont plus présents sur le versant Sud.

Nous supposons que la démarcation du versant Nord par rapport au versant Sud, en termes de disponibilité pédofaunique, est liée au facteur bioclimatique qui influence sans équivoque la zonation altitudinale de la végétation et par conséquent la disponibilité des taxons. Notre hypothèse est conforme aux travaux de plusieurs chercheurs notamment par [162 ; 163 ; 164 ; 7 ; 165 et 107] qui signalent, que la zonation altitudinale des écosystèmes forestiers méditerranéens répond à des critères thermiques, dont le plus déterminant étant la température moyenne annuelle (T) ou la moyenne des minima du mois le plus froid (m). En effet, une corrélation assez bonne peut être établie entre les valeurs de T et m pour définir les étages de végétation en région méditerranéenne. Meddour [107], avance qu'afin de définir les étages de végétation de l'Atlas Blidéen, par une approche plus

ombrothermique que simplement thermique, les critères T et m, et également les précipitations annuelles, ont été conjointement retenus. Il s'avère que, d'une façon générale, les découpages thermiques préconisés pour la péninsule ibérique par Rivas-Martinez sont satisfaisants et s'accordent bien, en bioclimats subhumide et humide, avec la végétation naturelle de cette portion de l'Atlas tellien. Par contre, en zone perhumide, les correspondances étages-variantes « corrigées » pour les régions montagneuses sublittorales à fortes précipitations, se traduisant par une élévation des valeurs de m, sont apparues plus adéquates. Selon le même auteur, c'est sur la base de ces principes qu'il convient d'observer que les stations d'altitude du versant Nord du massif de Chréa, où le critère thermique T prend ses valeurs les plus faibles ( $<12^{\circ}\text{C}$ ). Quant à m, bien que ses valeurs ne soient pas inférieures à  $0^{\circ}\text{C}$ , mais comprises dans la variante fraîche ( $0.4$  et  $1^{\circ}\text{C}$ ) (influence modératrice de la mer), les place indiscutablement dans l'étage supraméditerranéen ( $8 < T < 12^{\circ}\text{C}$  &  $-3 < m < 0^{\circ}\text{C}$ ). En revanche, pour les localités du versant Sud, les valeurs de m sont certes basses ( $0.8$  et  $1.3^{\circ}\text{C}$ ), en raison de la double influence continentalité-altitude, alors que celles de T demeurent élevées, de l'ordre de  $14^{\circ}\text{C}$ , leur rattachement au mésoméditerranéen est donc plus adéquat ( $12 < T < 16^{\circ}\text{C}$  &  $-0 < m < 5^{\circ}\text{C}$ ). En finalité, l'importance de l'augmentation ou de la diminution de la xéricité serait un facteur tranchant dans la zonation altitudinale de la végétation.

#### 4.1.2 Importance de la disponibilité de la pédofaune sous et hors canopée

Les invertébrés du sol sont généralement considérés comme des indicateurs utiles pour estimer le degré d'affectation par les activités humaines. Elle induit des perturbations physicochimiques entraînant divers stress (sécheresse, faible teneur en éléments nutritifs) [165]. Celles-ci limitent les conditions d'adaptation des organismes du sol et augmentent l'amplitude de leur niche écologique réalisée (niche écologique qu'une espèce est contrainte d'occuper dans un milieu donné) [166]. Les propriétés physicochimiques initiales des sols sont ainsi souvent capitales pour le maintien d'une diversité d'organismes du sol agissant sur plusieurs processus nécessaires à la fourniture des services écosystémiques (régulation du climat, production primaire) [165] mais reste mal exploré. L'étude de la structure communautaire ainsi que leur relation avec l'environnement et les facteurs fonctionnels restent très utiles pour évaluer la qualité et le fonctionnement des sols

forestiers. L'étude de la disponibilité pédofaunique entre la zone canopée et hors canopée est nécessaire pour mieux évaluer la qualité d'un sol en fonction de l'ouverture de la canopée. Nos résultats ont montré que le nombre de taxa enregistré est important pour les nématodes, et moins important pour la méso et la macrofaune, mais ne diffère pas significativement entre canopée et hors canopée sur les deux versants. Le nombre d'individus est très important pour l'ensemble de la pédofaune. Il est en faveur de la zone sous canopée dans le versant Nord. En revanche, dans le versant Sud, l'importance individuelle est en faveur de la zone hors canopée.

La disponibilité globale des nématodes, de la méso et de la macrofaune, montre des différences significatives pour la zone canopée, qui renferme les plus fortes abondances par rapport à la zone hors canopée. Ces différences de recrutement en effectifs présentent des discontinuités. Elles peuvent être permanentes ou temporaires et affectent diversement la biodiversité, dépendamment de la capacité de dispersion des espèces et de la nature des fragments résiduels (litière). Nos suggestions rejoignent la notion de composition des peuplements développée par [167 ; 168 ; 169 ; 170 ; 171 ; 172 et 158], qui avancent que la composition renvoie aux essences d'arbres dominant le peuplement. La composition d'un peuplement est donc en lien étroit avec les potentialités de la station forestière, (i.e. les conditions environnementales locales : sol, climat...), et peut fortement varier sur une superficie restreinte du fait, par exemple, de l'étagement altitudinal, des variations d'exposition ou de la profondeur du sol. La composition d'un peuplement varie également en fonction du stade de succession considéré (i.e. essences pionnières, secondaires et dryades), et elle est, en ce sens, fortement dépendante de la dynamique forestière en place.

Enfin, la composition est fortement influencée par la gestion, qui, pour des raisons de productivité, peut simplifier les peuplements en favorisant une essence au détriment d'une autre ou tout simplement soustraire les essences autochtones au profit d'essences allochtones plus rentables économiquement. Vis-à-vis de la biodiversité, les variations de composition ont un effet structurant fort sur la diversité et les assemblages d'espèces. En forêt boréale, il a ainsi été montré que des cortèges d'espèces différentes colonisaient différentes essences résineuses [171]

et que l'apparition des feuillus, en particulier le peuplier et le bouleau, jouait un rôle de support important pour la biodiversité [168]. D'une manière générale, en forêt boréale comme en forêt tempérée, il a été montré que le mélange des essences permettait d'augmenter la biodiversité totale d'un peuplement, cela en raison de la relation, parfois étroite, qui existe entre des cortèges d'espèces et une essence particulière d'arbre [167 ; 170 et 172]. Ainsi, il est globalement admis que les peuplements feuillus sont plus diversifiés que les peuplements résineux et que les peuplements mixtes sont plus diversifiés que les peuplements mono-spécifiques. Cet effet de la composition est lié d'une part à une plus grande hétérogénéité des ressources induites, (i.e. litières) [158], mais également des conditions abiotiques, (i.e. lumière) [169].

Dans le même sens d'idée, dans la forêt néotropicale du Costa Rica, Nadkarni et Longino [173], ont constaté une dominance relativement similaire des groupes d'invertébrés sous et hors canopée, notamment de collemboles, larves d'insectes, amphipodes, isopodes et de fourmis. Cette pédofaune est présente en densité importante, (2.6 fois plus grande) en hors canopée.

#### 4.1.3 Importance de la richesse et de la migration de la pédofaune inter-horizons

Les résultats obtenus durant nos investigations montrent que la méso et la macrofaune présentent une gradation négative par rapport à la profondeur du profil pédologique. Ainsi, au niveau du versant Nord, sous canopée, le gradient est au profit du profil  $H1 < H2 < H3$ . Cependant, en hors canopée, le profil H1 se distingue nettement des profils H2 et H3. En revanche, au niveau du versant Sud, sous canopée ou en hors canopée, le profil H1 s'individualise par une suprématie numérique par rapport aux profils H2 et H3. Satchell [174], note que la faune influence les caractéristiques chimiques des sols par des voies très variées. Ce que nous avons aussi constaté dans notre étude, à travers une préférence spécifique par horizon ou ensemble d'horizons chez les taxons inventoriés en relation étroite avec les paramètres abiotiques analysés.

En densités, la présence de la pédofaune inventoriée dans nos travaux est plus importante dans les premiers horizons pédologiques H1 (0- 10cm) et H2 (10-20cm) et diminuent dans les horizons profonds H3 (20-30cm). Bezkorovainaya et

Yashikhin [175], constatent une densité des pédobiontes et de leur distribution verticale élevées, certainement dus au rôle de la température du sol et de la teneur en eau. Nous déduisons que la richesse de la pédofaune est graduelle, diminuant en profondeur.

Dazzi et al. [176], indiquent qu'une migration verticale estivale de la mésofaune a été supposée des horizons organiques vers les horizons minéraux et vice-versa.

Une riche pédofaune est constatée sur les trois horizons pédologiques (H1, H2 et H3), distribuée de façon hétérogène en fonction des facteurs écologiques du milieu. Elle est composée de microfaune (*Aphelenchus sp.*, *Aphelencoides sp.*, *Tylenchus sp.*, *Ditylenchus sp.*, *Eurydorilaimus sp.* et *Ecumenicus sp.*, *Monochus sp.*, *Cephalobus sp.*, *Dorylaimus sp.* et *Helicotylenchus sp.*) et de méso et macrofaune (*Lumbricus terrestris*, *Geophilus sp.*, *Collembola sp.*, *Phytoseiida sp.* et *Brachyiulus sp.*).

L'horizon H1 (0–10 cm) est préféré par un réseau trophique composé par *Pratylenchus sp.*, *Aphelenchus sp.*, *Helicotylenchus sp.*, *Aphelencoides sp.*, *Tylenchus sp.*, *Ditylenchus sp.*, *Eurydorilaimus sp.*, *Ecumenicus sp.*, *Monochus sp.*, *Cephalobus sp.* et *Dorylaimus sp.* (microfaune). Et par *Phytoseiida sp.*, *Gamasida sp.* et *Oribatida sp.* (méso et macrofaune). Horizon sur lequel, trois taxons semblent y préférer une présence exclusive : *Pratylenchus sp.*, *Gamasida sp.* et *Oribatida sp.*.

L'horizon H2 (10–20 cm) est exclusivement peuplé par les taxons *Helicotylenchus sp.* et *Geophilus sp.*.

En combinaison, les taxons *Dorylaimus sp.*, *Pratylenchus sp.*, *Gamasida sp.* et *Oribatida sp.* semblent préférer les horizons H1 et H2.

Pour le troisième horizon H3 (20 cm–30 cm), il ne présente de préférence pour aucun des taxons micro, méso ou macrofaune inventoriés.

Selon Ladjali [177], les valeurs de la diversité du sol de la cédraie sont élevés dans les horizons H1 (0-10cm) est diminuent sensiblement en allant en profondeur (10-20 cm et 20-30 cm).

Nous estimons que la diversité faunistique d'un sol forestier est influencée par les caractéristiques physico-chimiques du sol (pH, matière organique et texture), les saisons, l'exposition (Nord, Sud), les sites de prélèvements (sous canopée, hors canopée) et les horizons pédologiques (H1, H2, H3). Ce que confirment à leur manière Jones et al. [178] et Lavelle et al. [179], qui concluent que certains organismes de la faune du sol (comme les lombriciens) modifient également le sol en tant qu'habitat pour d'autres espèces par leurs activités de bioturbation (organismes ingénieurs). La faune du sol intervient également fortement dans la formation de micro-agrégats où se forment d'importantes interactions bio-organominérales protégeant la matière organique des sols de la décomposition [180 ; 181 ; 182].

Ces différences en richesses, mais aussi en mobilité de la pédofaune sous cédraie, peuvent être imputées, comme l'indique Dazzi et al. [176], en faisant une comparaison avec une pinède, que les horizons superficiels sous pin sont bien structurés et présentent une forte structure « crumby », tandis que dans les horizons homologues sous cèdre, la structure est faible et peu claire. Contrairement aux conclusions de Mori et al. [183], qui constatent au niveau de la cédraie de la forêt de Kyoto (Japon) une délimitation verticale nette entre les différents horizons. Ceci a été obtenu par la méthode optique qui a ainsi démontré des différences dans les activités biologiques du sol et les modèles de transformation de la litière.

#### 4.1.4 Importance de la disponibilité des taxons durant la saison humide par rapport à la saison sèche

La visualisation de la tendance générale de la disponibilité de la pédofaune montre une croissance progressive des abondances dès le début de la saison humide (novembre-décembre), avec un niveau global supérieur vers la fin de la même saison (février-mars-avril). Les abondances ont une tendance générale à diminuer graduellement dès le début de la saison sèche présentant une faible disponibilité

durant cette saison. La saison humide dépasse significativement la saison sèche en termes d'abondance. Selon Gobat et *al.* [12], la faune du sol a aussi une influence marquée sur la biochimie des sols et ses diverses caractéristiques biologiques. De nombreux chercheurs se sont intéressés à la composition enzymatique des sols pour mieux en définir l'activité biologique. En enrichissant le potentiel enzymatique des sols, la faune a une action catalytique sur leur activité biologique, mais cette action se manifeste encore de bien d'autres façons.

Pour Arpin et *al.* [184], les populations de nématodes présentent des densités variables dans l'année et il est quelquefois possible de mettre en évidence des cycles saisonniers. C'est ainsi que dans des forêts de conifères d'Europe septentrionale les minima s'observent en été et les maxima en hiver ou automne-hiver. Les acariens oribates, les collemboles symphypléones et entomobryomorphes sont plus abondants en été (mois de juin), alors que les collemboles poduromorphes en hiver (mois de décembre).

La tendance saisonnière sous cèdre a montré une valeur de la mésofaune plus faible en février et juillet dans les horizons organiques que dans les horizons minéraux. L'inverse a été détecté en novembre et mai. Les résultats de l'enquête ont montré non seulement le rôle joué par le couvert forestier mais aussi par l'activité de la mésofaune dans le conditionnement d'aspects particuliers de la qualité du sol [176].

Arpin et *al.* [184], ont travaillé sur la mésofaune et la microfaune en milieu forestier et constaté que les acariens sont présents au mois de janvier et les Collemboles au mois d'octobre dans le niveau 0-5 cm de profondeur.

#### 4.2. Impact des cascades trophiques sur le développement du cèdre

Du point de vue de l'écologie, les résultats montrent l'importance des conditions environnementales locales en lien avec les exigences écologiques des espèces dans la structuration de leurs assemblages. Replacés dans le contexte des règles d'assemblages des communautés, les résultats indiquent un effet limité, voire nul, du filtre de dispersion sur le pool régional (effet versants) d'espèces mais un effet

fort du filtre abiotique. En forêt de montagne, il semble ainsi que le filtrage environnemental, stricto sensu [185], soit avant tout conditionné par une limite d'habitat, elle-même liée à la mise à disposition, pour les espèces, de conditions environnementales optimales (i.e. maturité des peuplements), mais aussi des conditions édaphiques et climatiques.

L'importance des paramètres du peuplement, notamment de maturité, mais aussi des conditions abiotiques (i.e. lumière, sol et climat), souligne l'existence d'une limite d'habitat forte, non seulement entre peuplements peu et très matures mais aussi, dépendamment des groupes taxinomiques considérés, entre peuplements plus ou moins chauds, plus ou moins acides ou caractérisés par des humus plus ou moins actifs. Ce rôle structurant fort des conditions abiotiques, en particulier climatiques, est sans aucun doute à mettre en lien avec les variations d'altitude et d'exposition propres aux territoires de montagne, créant ainsi des contrastes parfois très importants à petite échelle. Aussi, l'effet parfois peu marqué de la maturité sur la biodiversité est sans doute à rattacher, pour partie, à un gradient pas assez tranché entre peuplements peu et très matures. Cette différenciation de la niche dans les cascades trophiques considérées dans nos travaux se compose de micro, méso et macrofaune. Pour Ferreira et *al.* [186], la faune du sol peut être utilisée comme bioindicateur de la qualité du sol et du fonctionnement de l'écosystème.

La prise en compte de la chronologie de recrutement et d'arrivée des taxons nématologiques dans le sol de cédraie, au sein des communautés trophiques respectives, semble similaire. Cet état de fait est attribué à une arrivée des assemblages trophiques en cascade en relation avec différents facteurs environnementaux notamment ceux liés à la disponibilité des proies et aliments et aux compétitions interspécifiques des guildes des taxons bénéfiques. Nous avons observé chez les peuplements nématologiques une arrivée successive suivant un gradient décroissant *Cephalobus sp.* (Bactérovores) > *Ditylenchus sp.* (Fungivores) > *Tylenchus sp.* (Phytophages) > *Mononchus sp.* (Prédateurs) > *Dorylaimus sp.* (Omnivores) > *Ecuminicus sp.* (Omnivores).

Concernant la méso et la macrofaune, nous avons observé des fluctuations des communautés des groupes trophiques correspondant à une composition diversifiée



et non spécifique. Ainsi, l'étude de la structuration des peuplements de méso et macrofaune inféodés aux différents biotopes indique que l'ensemble des espèces semblent trouver leur milieu adéquat. L'ordre d'arrivée écologique des espèces fait distinguer deux communautés : (i) les espèces dominantes, dont la plupart acquièrent le statut trophique de phytosaprophages (*Oribatida* sp. (phytosaprophage), *Gamasida* sp. (prédateur), *Collembola* sp. (phytosaprophage) et *Lumbricus terrestris* (phytosaprophage)) ; et (ii) les espèces marginales, principalement à statut trophique prédateurs (*Phytoseiida* sp. (prédateur), *Geophilus* sp. (prédateur) et *Brachyiulus* sp. (phytosaprophage)).

Ces cascades trophiques de la micro, méso et macrofaune, identifiés à travers nos travaux, sont des facteurs influents sur le développement du cèdre ; notamment en ce qui concerne la phytomasse, l'activité photosynthétique et l'expression biochimique exprimées durant les saisons humide et sèche au niveau des versants. D'après Sarmoum et *al.*, (2018) in Sarmoum et al. [109], le Cèdre de l'Atlas, dans la région de Theniet El Had (Algérie), se développe surtout sur le versant Nord.

Qiu et *al.* [187], qui ont travaillé sur la contribution de la micro et mésofaune au cycle de nutrition dans la forêt des montagnes de Changbai (Chine), suggèrent qu'une meilleure compréhension de l'influence de la faune du sol sur le cycle des nutriments est nécessaire pour comprendre les mécanismes de circulation de la matière.

Ces intenses activités sont essentiellement dues à un développement important de communautés de pédofaune que nous avons inventoriées, à forte abondance au niveau des horizons superficiels du sol, renfermant des nématodes phytophages, fungivores, omnivores et prédateurs, d'une mésofaune de prédateurs et d'une macrofaune de phytosaprophages.

Bezkorovaynaya et *al.* [188], ont identifié une corrélation entre l'activité trophique du biote du sol et la biomasse et la densité des invertébrés du sol, constatant que les principales distinctions dans la structure, la densité et la biomasse des invertébrés du sol se rapportent à la formation du tapis forestier.

Les conclusions tirées plus haut quant à l'impact des cascades trophiques sur le développement du cèdre sont confirmés par les différentes abondances spécifiques ainsi que leurs différentes interactions avec les facteurs biotiques et abiotiques. Ceci est aussi confirmé par Moradi et *al.* [189], qui notent que l'abondance de la plupart de la faune du sol était en corrélation positive avec une augmentation du couvert végétal et de l'apport de la litière.

A cet effet, nous avons enregistré, sur le plan fonctionnalité, une abondance d'un phytosaprophage (*Brachyiulus sp.*) et d'un prédateur (*Geophilus sp.*) sur sol riche en argile et en limon fin et grossier.

Leur disponibilité dans de telles conditions, permet au cèdre d'exprimer une meilleure production de phytomasses sèche et fraîche, présentant une quantité très importante de caroténoïdes. Ces paramètres renforcent l'assimilation de la lumière solaire, transmise sous forme d'énergie lumineuse à la chlorophylle. L'activation photosynthétique sera soldée par une production de métabolites primaires (sucres solubles totaux), de métabolites secondaires (composés phénoliques) et enfin une meilleur absorption des éléments minéraux.

D'après Perry et *al.* [190], la richesse en espèces de la mésofaune des sols minéraux est corrélée de manière significative avec le pourcentage de sol de la matière organique et de l'humidité du sol, tandis que la richesse de la mésofaune du sol forestier est corrélée avec la profondeur du sol forestier.

Pour les autres paramètres étudiés, nous avons constaté que l'installation d'une cascade trophique, en saison humide ou en saison sèche, renferme des phytosaprophages (*Oribatida sp.* et *Collembola sp.*) ainsi que des prédateurs (*Phytoseiida sp.* et *Gamasida sp.*), sur sol riche en matière organique et très aéré.

D'après Mori et *al.* [183], les formes d'humus peuvent varier dans différents peuplements forestiers, mais l'influence locale des arbres sur les activités microbiennes et fauniques du sol reste encore mal connue.

Ces conditions favorisent une intense activité photosynthétique du cèdre (plus de chlorophylle totale), conduisant à une forte production de jeunes pousses (nombre important de touffes d'aiguilles), représentant les résultats d'une expression significative des teneurs des composés chimiques sur le versant Nord par comparaison au versant Sud. Ainsi, nous avançons l'hypothèse de l'impact des changements globaux sur la réduction de l'activité biochimique du cèdre au niveau du versant Sud (bioclimat mésoméditerranéen). Nos résultats rejoignent, les travaux de Cornic [191] et Zhu [192], qui signalent que la fermeture des stomates et/ou la diminution de leur densité sont connus pour réduire à la fois la photosynthèse et la concentration en CO<sub>2</sub> dans les plantes. La réduction enregistrée de la Chl A et B a été probablement causée par la dégradation des enzymes impliquées dans la biosynthèse de la chlorophylle [193 ; 194].

Sur le plan, physiologique, l'expression des métabolites primaires, notamment les acides aminés et les protéines, est maximale. Cette activité est supportée par une production intense de la proline, en tant que constituant protéique osmorégulateur. Nous rappelons que la proline est un soluté très fréquemment accumulé en réponse à des contraintes environnementales variées et joue un rôle important dans la tolérance des plantes.

Globalement, les espèces qui se sont montrées les plus sensibles au stress, réagissent en accumulant plus rapidement de la proline. L'induction de proline dans la réponse au stress dépend dans une large mesure de la nature du stress [195]. Ainsi, un taux de proline élevé observé dans les aiguilles du cèdre sous l'action du glissement climatique, pourrait être le résultat d'une diminution de son oxydation et/ou d'une réduction de son utilisation dans la synthèse protéique [196]. De même, une hydrolyse des protéines riches en proline et/ou une synthèse activée de cet acide aminé aboutiraient à son accumulation dans les cellules [197]. L'augmentation de la proline est due à la capacité de certaines plantes à accumuler des composés organiques et inorganiques dans le cytoplasme pour réduire le potentiel hydrique et modifier le gradient osmotique, assurant la présence de l'eau dans la plante [198]. La proline accumulée pourrait jouer un rôle d'osmoticum. Elle pourrait, également, intervenir dans la régulation du pH cytoplasmique ou constituer une réserve d'azote utilisée par la plante postérieurement durant la période de stress [199].

L'examen des données abiotiques et biotiques sur les deux versants du Parc National de Chr a, permet de formuler l'hypothèse que les dépérissements sont imputables à un déficit des précipitations combiné à une augmentation des températures, en liaison avec plusieurs épisodes de sécheresse au cours de la période 1986-2015.

Au cours de ces années, les conditions climatiques ont eu un impact négatif sur la vitalité du cèdre, ce qui a entraîné la mort de nombreux arbres. L'aridification, très visible sur le versant Sud, a eu des effets particulièrement sensibles dans les secteurs où les conditions initiales étaient déjà éloignées de l'optimum écologique de l'espèce. La disparition de niches écologiques dans les secteurs les plus bas de l'aire de répartition de l'espèce a provoqué une remontée de la limite altitudinale inférieure, de 1800   2000 m ; le cèdre abandonnant progressivement la place à une chênaie (*Quercus ilex* L.)   genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus* L.).

Le cèdre subit ainsi une dégradation généralisée à la limite inférieure de son aire de répartition, la succession d'années sèches provoquant son affaiblissement physiologique dans les stations les moins favorables. Affaibli, le cèdre ne peut plus résister à la concurrence du chêne vert.

Toutefois, à égale altitude, plusieurs facteurs font que les versants globalement exposés au Sud, sont plus ensoleillés se distinguent de ceux globalement exposés au Nord. L'affaiblissement du cèdre est donc plus prononcé sur le versant Sud que sur le versant Nord.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La recherche de la compréhension des effets de la combinaison des facteurs écologiques sur le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) dans le Parc National de Chréa, est un travail original, contribuant largement à développer les connaissances dans le domaine et à entrevoir les possibles pistes de recherches scientifiques futures. Son originalité réside dans l'analyse de la combinaison des différents facteurs écologiques afin d'identifier les rôles et interactions de la pédofaune dans des conditions abiotiques déterminées et au sein de formations à cédraies.

L'analyse des différents paramètres étudiés et les interactions pouvant les gouverner, nous permet de conclure qu'en ce qui concerne (i) l'effet exposition, la faune du sol sous cèdre, préfère et est plus disponible sur le versant Nord. Pour ce qui est de (ii) la couverture (sous ou hors canopée), et en dépit d'une présence plus importante de la microfaune par rapport à la méso et macrofaune du sol, la pédofaune ne présente pas de préférence sous/hors canopée sur les deux versants. (iii) la richesse et la migration de la pédofaune inter-horizons édaphiques présente une gradation négative par rapport à la profondeur du profil pédologique, notamment influencée par les caractéristiques physico-chimiques du sol, les saisons, l'exposition, la couverture des sites de prélèvements et les horizons pédologiques. Enfin, que (iv) la disponibilité des taxons durant les saisons est progressivement abondante du début de la saison humide, culminant à son maximum à la fin de la même période, diminuant jusqu'à s'affaiblissant en saison sèche.

Par ailleurs, l'analyse des relations cascades trophiques de la pédofaune avec le développement du cèdre, nous a permis de conclure que (i) les conditions environnementales et écologiques jouent un rôle important dans la structuration des assemblages communautaires, moins influencée par l'effet versant que par les facteurs abiotiques, différenciant la niche trophique en micro, méso et macrofaune. (ii) le recrutement au sein des communautés trophiques de la microfaune est similaire, conditionné par différents facteurs environnementaux et des compétitions interspécifiques ; alors qu'il est hétérogène chez les communautés trophiques de la

méso et macrofaune, caractérisées par des compositions diversifiées et non spécifiques, mais permettant tout de même à l'ensemble des espèces de trouver leur milieu adéquat.

Ces cascades trophiques, de par leur composante communautaire (nématodes phytophages, fungivores, omnivores et prédateurs, d'une mésofaune de prédateurs et d'une macrofaune de phytosaprophages), influencent le développement du cèdre en matière de phytomasse, d'activité photosynthétique et d'expression biochimique.

Ajouté à cela, une combinaison abondance spécifique avec les facteurs biotiques et abiotiques impacte le développement du Cèdre de l'Atlas. Une abondance de phytosaprophage (*Brachyiulus sp.*) et de prédateur (*Geophilus sp.*) sur sol riche en argile et en limon fin et grossier permet au cèdre d'exprimer une meilleure production de phytomasses sèche et fraîche, présentant une quantité très importante de caroténoïdes. Cette situation renforce les fonctions photosynthétiques du végétal et ainsi ses capacités pour une meilleure séquestration des émissions de carbone, permettant au cèdre de jouer un important rôle dans la lutte contre le réchauffement climatique. Le même constat est à faire pour ce qui est de l'installation de la cascade trophique à phytosaprophages (*Oribatida sp.*) et *Collembola sp.* ainsi que les prédateurs (*Phytoseiida sp.* et *Gamasida sp.*), sur sol riche en matière organique et très aéré, durant les saisons humides et sèches, qui favorisent les capacités de séquestration de carbone.

La production intense de proline, qui rappelons-le est un constituant osmorégulateur, montre une réponse, que nous identifions comme étant due à l'élévation de température induite par le changement climatique qu'enregistre la région, au stress qu'est en train de subir le Cèdre de l'Atlas à Chréa. Ceci est aussi confirmé par l'examen des données abiotiques et biotiques sur les deux versants du Parc National de Chréa, qui permettent d'exprimer l'hypothèse que les dépérissements sont imputables à un déficit des précipitations combiné à une augmentation des températures, en liaison avec plusieurs épisodes de sécheresse au cours de la période 1986-2015. Les conditions climatiques ont eu un impact négatif sur la vitalité du cèdre, entraînant la mort de nombreux arbres. L'aridification, très visible sur le versant Sud, a eu des effets particulièrement sensibles dans les

secteurs où les conditions initiales étaient déjà éloignées de l'optimum écologique de l'espèce.

Il est enfin constaté une dégradation généralisée du Cèdre de l'Atlas, avec un affaiblissement de présence au niveau du versant Sud par rapport au versant Nord, causée par des facteurs abiotiques de plus en plus influents sur le développement du cèdre et réduisant son aire de répartition.

A la lumière des résultats que nous avons enregistrés, participant pleinement à l'amélioration des connaissances et de la compréhension des interactions et rôles des facteurs écologiques abiotiques et biotiques, en particulier, la pédofaune de la cédraie, nous considérons qu'il reste d'innombrables pistes de recherches et d'études qui devraient être explorées. Toutefois, les nouvelles perspectives devraient être basées sur les priorités nationales et locales de préservation et de développement des cédraies en Algérie. Il est nécessaire d'approfondir les connaissances du fonctionnement et des influences de la pédofaune sur la préservation et le développement du Cèdre de l'Atlas, dans le but d'atténuer sa dégradation, son dépérissement et améliorer et valoriser ses rôles et impacts de lutte contre le changement climatique.

Les connaissances sur l'écologie et la biologie de chacune des espèces formant les réseaux trophiques dressés restent malgré tout fragmentaire en Algérie et, bien que nous ayons proposé ici certaines voies d'interprétation, de nombreuses questions subsistent. Par exemple quel est l'intérêt d'adaptation des mêmes taxons au glissement des saisons ? Combien existe-t-il de sous-systèmes dans les cascades trophiques de la même saison ? Quel sont les capacités et les modes de dispersion de la pédofaune par rapport à l'ouverture de la canopée ?

Le statut de bio-indicateurs que les acariens et collemboles se voient actuellement attribués impose que ces animaux soient connus avec précision. Une évaluation patrimoniale et de l'état écologique de la cédraie est-elle recevable lorsqu'elle est construite à partir de taxons liés aux versants ? En d'autres termes, jusqu'à quel point l'état de la communauté pédofaunique reflète-t-il celui d'un sol sous cèdre ? Que dire des espèces rares dont le statut de rareté dépend directement de la

pression d'observation ? Actuellement, il n'existe pas de liste de référence pour ces bio-indicateurs, les quelques listes partielles mises à part les travaux de Ghezali [200] qui portent sur la systématique et bioécologie des acariens du sol (Acari-Oribatida) en Algérie (pour les acariens et les collemboles). Une première priorité sera de compléter la base de données mise en place dans notre étude en l'argumentant d'informations écologiques géographiquement référencées.



## RÉFÉRENCES

1. Boudy, P., "Economie forestière Nord-Africaine : Monographie et traitement des essences forestières", Ed. Larose, T2, (1950) 529 - 619.
2. Benabid, A., "Biogéographie phytosociologie des cédraies de l'Atlas à *Cedrus atlantica* Manetti", Ann. Rech. For. Maroc, 27, (1994) 62 - 76.
3. Terrab, A., Hampe, A., Lepais, O., Talavera, S., Vela, E. et Stuessy, T.F., "Phylogeography of North African Atlas cedar (*Cedrus atlantica*, Pinaceae): combined molecular and fossil data reveal a complex quaternary history", Am. J. Bot., 95, (2008) 1262 - 1269.
4. El Azzouzi, K. et Keller, R., "Propriétés technologiques du bois de cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti)", *Forêt méditerranéenne*, 19, (1989) 11 - 33.
5. Messaoudene, M., Loukkas, A., Janin, G., Tafer, M., Dilem, A. et Gonzalez, J., "Propriétés physiques du bois d'éclaircie des cèdres (*Cedrus atlantica*), contenant du bois de compression, provenant de l'Atlas du Djurdjura (Algérie)". Ann. For. Sci., 61, (2004) 589 - 595.
6. Toth, J., "Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans le Sud de la France". Thèse Doc. Ing. Fac. St. Jérôme. Marseille, France. (1978) 136 p.
7. M'hirit, O., "Etude écologique et forestière des cédraies du Rif Marocain : Essai sur une approche multidimensionnelle de la phytoécologie et de la production du Cèdre de l'Atlas", Ann. Rech. For. Maroc2(1), (1982) 499 p.
8. Mouna, M. et Fabre, J.P., "Pest insect of cedars: *Cedrus atlantica* Manetti, *C. libani* A. Richard and *C. brevifolia* Henry in Mediterranean area, Entomological Research in Mediterranean Forest Ecosystems", INRA, France, (2005) 89 - 103.
9. Bentouati, A. et Bariteau, M., "Réflexions sur le dépérissement du Cèdre de l'Atlas des Aurès (Algérie) ", *Forêt méditerranéenne*, 27: (2006) 317 - 322.
10. Demarteau, M., Francois, L., Cheddadi, R. et Roche, E., "Responses of *Cedrus atlantica* when faced with past and future climatic changes", *Geo. Eco. Trop.*, 31, (2007) 105 - 146.

11. Linares, J.C., Taïqui, L. et Camarero, J.J., "Increasing drought sensitivity and decline of Atlas Cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan Middle Atlas forests", *Forests*, 2 (2011) 777 - 796.
12. Gobat, J.M., Aragno, M. et Matthey, W., "Le sol vivant : Bases de pédologie, Biologie des sols". Presses polytechniques et universitaires romandes (ed), (2003) 528 p.
13. Bachelier, G., "La faune des sols, son écologie et son action", V.R.S.T.M., Init. Doc. Tech. 38, (1978) 391 p.
14. Halimi, A., "L'Atlas Blidéen : climat et étages végétaux", O.P.U., Alger, (1980) 523 p.
15. Larid, D., "Comparaison faunistique entre trois stations au mont Mouzaïa dans le Parc National de Chréa", Mém. Ing. Agr., I.N.A., Alger, (1989) 95 p.
16. Doumandji S. et Doumandji-Mitiche B., "Les mantes du Parc National de Chréa". *Ann. Soc. Entomol. Fr.*, 29(1), (1993) 105 – 106.
17. Mazari, G., "Etude faunistique de quelques stations du parc national de Chréa", Thèse Magister, Inst. Nat. Agro., El-Harrach, Alger, Algérie. (1995) 165 p.
18. Athmani, L., "Comparaison faunistique entre trois stations dans le parc national de Belezma (Batna)", Institut National Agronomique El-Harrach, Alger, (1988) 97 p.
19. Lavelle, P., "Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function", *Advances in Ecological Research*, 27, (1997) 93 -132.
20. Hunt, H.W. et Wall, D.H., "Modelling the effects of loss of soil biodiversity on ecosystem function", *Global Change Biology*, 8 (2002) 33 - 50.
21. Scheu, S., Schlitt, N., Tuinov, A.V., Newington, J.E. et Helfin, J.T., "Effects of the presence and community composition of earthworms on microbial community functioning", *Oecologia*, 133, (2002) 254 - 260.
22. Fitter, A.H., "Darkness visible: reflections on underground ecology", *Journal of Ecology*, 93 (2005) 231 - 243.
23. Loreau, M., Naeem, S., Inchausti, P., Bengtsson, J., Grime, J.P., Hector, A., Hooper, D.U., Huston, M.A., Raffaelli, D., Schmid, B., Tilman, D. et Wardle, D.A., "Biodiversity and Ecosystem functioning: Current Knowledge and Future Challenges", *Science*, 294 (2001) 804 – 808.

24. Hector, A., "Biodiversity and the functioning of grassland ecosystems: multi-site comparisons", In Functional consequences of biodiversity: experimental progress and theoretical extensions, (2002) 71 – 95.
25. Hooper, D.U., Chapin, III, F.S., Ewel, J.J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J.H., Lodge, D.M., Loreau, M. Naeem, S., Schmid, B., Setälä, H., Symstad, A.J., Vandermeer, J. et Wardle, D.A., "Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge", Ecological Monographs, 75, (2005) 3 – 35.
26. Postma-Blaauw, M.B., De Vries, F.T., de Goede, R.G.M., Bloem, J., Faber, J.H. et Brussaard, L., "Within-trophic group interactions of bacterivorous nematode species and their effects on the bacterial community and nitrogen mineralization", Oecologia, 142, (2005) 428 – 439.
27. Van Ruijven, J. et Berendse, F., "Diversity–productivity relationships: Initial effects, longterm patterns, and underlying mechanisms", Proceedings of the National Academy of Sciences, USA 102 (2005) 695 – 700.
28. Decaëns, T., Jiménez, J.J., Gioia, C., Measey, G.J. et Lavelle, P., "The values of soil animals for conservation biology", Eur. J. Soil Biol., 42, (2006) S23 - S38.
29. Benchekroun, F., "L'économie de la cédraie marocaine et son impact sur le développement des collectivités locales", Annales des Recherches Forestières du Maroc 27 (spécial), (1993) 714 - 724.
30. M'hirit, O., Benzyane, M. et Blerot, P., "Le Cèdre de l'Atlas : Mémoire du temps", Éd. Mardaga, (2006), 245 p.
31. Terrab, A., Paun, O., Talavera, S., Tremetsberger, K., Arista, M. et Stuessy, T.F., "Genetic diversity and population structure in natural populations of Moroccan Atlas cedar (*Cedrus atlantica*; Pinacea) determined with cpSSR markers", American Journal of Botany 93(9), (2006) 1274 - 1280.
32. Harfouche, A. et Nedjahi, A., "Prospection écologique et sylvicole dans les cédraies du Belezma et de l'Aurès à la recherche de peuplements semenciers et d'arbres", Rev. For. Fr. Vol. 55, n°2, (2003) 113 - 122.
33. Gaussen, H., "Les gymnospermes actuelles et fossiles", Faculté des sciences de Toulouse, Fasc. 7, (1967) 477 p.

34. M'hirit, O., "Le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) présentation générale et état des connaissances à travers le réseau Silva Mediterranea" "Le cèdre", Ann. Rech. For. Maroc, T (27), (1994) 3 - 21.
35. De Vilmorin, G.B., "Histoires d'arbres", Ed. Jean-Paul Gisserot, Paris, (2003) 280 p.
36. M'hirit, O. et Benzyane M., "Taxonomie et répartition historique", Ed. Mardaga, (2006) 13 – 26.
37. Toth, J., "Le cèdre de France - Etude approfondie de l'espèce", Ed. L'harmattan. Paris, (2005) 207 p.
38. Maire, R., "Flore de l'Afrique du Nord", Encyclopédie biologique, Volume 1. Paul Lechevalier Editeur, Paris, (1952) 366 p.
39. Quezel, P. et Santa, S., "Nouvelle flore de l'Algérie et des régions méridionales désertiques", C.N.R.S. Paris, (1962) 565 p.
40. Derridj, A., "Etude des populations de *Cedrus atlantica* M. en Algérie", Thèse. Doc., Uni. Paul Sabatier. Toulouse, (1990) 112 - 122.
41. Toth, J., "Le cèdre III : Intérêt paysager, Cédraie touristique", Forêt privée, n° 195, (1990) 8 p.
42. Toth, J., "Le Cèdre dans quelques pays du pourtour Méditerranéen et dans deux autres pays à grande importance forestière". Forêt méditerranéenne. T. II. N° 1. (1973) 1980.
43. Toth, J., "Plus que centenaire et plein d'avenir : le cèdre en France", Rev. For. Fr, vol. 22, (3), (1970) 355 - 364.
44. Boudy, P., "Guide du forestier en Afrique du Nord", Ed. La Maison Rustique, (1952) 505 p.
45. Ledant, J.P., "Essences forestières algériennes endogènes et exogènes", Notes de cours de dendrologie, Alger, (1975) 133 p.
46. Arbez, M., Ferrandes, P. et Uyar, N., "Contribution à l'étude de la variabilité géographique des cèdres", Ann. Sci. For 35(4) : (1987) 265 – 284.
47. Jacamon, M., "Guide de Dendrologie : arbres, arbustes, arbrisseaux des forêts françaises Tome I : Conifères", Ecole Nationale du Génie rural, des eaux et des forêts. Uni. Paul Sabatier, Toulouse, (1987) 112 - 122.
48. Beloula, S., "Etude sur le dépérissement du Cèdre de l'Atlas dans le Parc National de Belezma (Wilaya de BATNA) : Apport de la télédétection et SIG",

- Thèse de Magistère, Université El Hadj Lakhdar de Batna, Faculté des Sciences, Département d'Agronomie, (2010) 95 p.
49. El Azzouzi, K. et Keller, R., "Propriétés technologiques du bois de cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti)", Forêt méditerranéenne, 19 : (1998) 11 - 33.
  50. Lecompte, M. et Lepoutre, B., "Bilan de l'eau et conditions d'existence de la cédraie dans le Moyen Atlas Basaltique (Maroc)", Ann. Rech. For. Maroc, t.5. (1975) 153 - 282.
  51. Lepoutre, B. et Pujos, A., "Facteurs climatiques déterminant les conditions de germination et d'installation des plantules de Cèdre", Ann. Rech. For. Maroc, t.7, (1963) 23 - 54.
  52. Aussenac, G., "Le cèdre : essai d'interprétation bioclimatique et écologique", Bull. Soc. Bot. Fr., Actuel Bot., (2/3/4), (1984) 385 - 398.
  53. Bentouati, A., "Première approche à l'étude de la croissance et de la productivité du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif de Bélezma", Thèse Magistère Uni. Batna, (1993) 249 p.
  54. Naggar, M., "La régénération du cèdre dans le moyen Atlas central au Maroc : Quelle issue pour la durabilité de l'écosystème de la cédraie ?" Forêt méditerranéenne t. XXXIV, n° 1, (mars 2013) 25 – 34.
  55. Pradal, F., "Variabilité génétique et écophysiological du cèdre", Résumé, INRA - Département Forêt, Nancy, (1979) 89 p.
  56. Abdessamed, K., "Réflexion sur les cédraies algériennes", Bull. Tech. Forest. n° 6, (1981) 7 – 10.
  57. M'hirit, O., "Le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) : Présentation générale et état des connaissances à travers le réseau Silva Mediterranea", Actes du séminaire international sur le Cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7-11 juin 1993. Annales de la recherche forestière au Maroc 27 (spécial), (1993) 4 - 21.
  58. Ouadah, N., Kadik, L., Bendjedda, N. et Kaabèche, M., "Impact du feu sur la stratégie de régénération d'espèces végétales forestières méditerranéennes", Revue d'Ecologie (La terre et la vie), 71(4), (2016) 356 – 366.
  59. Rabhi, K., Akli, A., Djouhri, A., Yahi, N., Boudedja, S. et Messaoudene M., "Bilan et croissance des reboisements de cèdre de l'Atlas, *Cedrus atlantica*

- (Endl.) Carrière, en Algérie : cas du Djurdjura et de l'Atlas Blidéen", Bois et Forêts des Tropiques, 337. (2018) 3 – 15.
60. Bell, B.A., Fletcher, W.J., Cornelissen, H.L., Campbell, J.F.E., Ryan, P., Grant, H. et Zielhofer, Ch., "Stable carbon isotope analysis on fossil *Cedrus* pollen shows summer aridification in Morocco during the last 5000 years", *Journal of Quaternary Science*, (2019) 1 – 10.
61. Khanfouci, M.S., "Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans le massif du Belezma", Thèse Mag. Uni. Batna. (2005) 63 p.
62. Ducrey, M., "Adaptation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) au climat méditerranéen, Aspect écophysiological de sa réaction à la sécheresse", *Ann. Rech. For. Maroc. T27 (spécial)*, (1994) 139 - 153.
63. M'hirit, O., "Le grand livre de la forêt marocaine", Ed. Mardaga, (1999) 280 p.
64. Quezel, P., "Cèdres et cédraies du pourtour méditerranéen : signification bioclimatique et phytogéographique", *Forêt méditerranéenne t. XIX, n° 3*, (novembre 1998) 243 – 260.
65. Sabatier, S., Baradat, P. et Barthelemy, D., "Intra and interspecific variations of polycyclism in young trees of *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex. Carrière and *Cedrus libani* A. Rich (Pinaceae)", *Ann. For.Sci.*, 60: (2003) 19 - 29.
66. Emberger, L., "Contribution à la connaissance des cédraies et en particulier du Deodora et du Cèdre de l'Atlas", *Rev. Bot. Appl et Agri n°198*, (1938) 77 - 92.
67. Lamhamedi MS., et Chaouki C., 1994, "Les principaux facteurs influençant la régénération naturelle du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.)", *Ann. Rech. For. Maroc, T (27)*, (1994) 243 - 257.
68. El Mderssa, M., Belghazi, B., Benjelloun, H., Zennouhi, O., Nassiri, L. et Ibjibijen, J., "Estimation of carbon sequestration using allometric equations, in Azrou Cedar Forests (*Cedrus atlantica* Manetti) in the Central Middle Atlas of Morocco under Climate Change", *Open Journal of Forestry*, 9, (2019) 214 - 225.
69. Benhalima, S., "Les insectes xylophages et leur rôle dans le dépérissement du Cèdre de l'Atlas *Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière dans le Haut et le Moyen Atlas (Maroc)", Thèse Doc., Univ. Moh. V- Agdal, Rabat, (2004) 107 p.

70. Toth, J., Le cèdre dans quelques pays du pourtour méditerranéen et dans deux autres pays à grande importance forestière, For. Méd., 2: (1980) 23 - 30.
71. Ghaïoule D. et Lieutier F., Déperissement du cèdre et relations avec les facteurs biologiques dans le Moyen Atlas, Ann Rech For Maroc 41: (2009) 69 – 77.
72. Alexandrian, D., “Essences forestières : guide technique du forestier méditerranéen français, CEMAGREF, France, (1992) 92 p.
73. Bahri, B., “Contribution à l’étude de l’influence des facteurs édaphiques, orographiques et biologiques sur la régénération naturelle du cèdre de l’Atlas (*Cedrus atlantica*. M) dans les monts des Ouled Yagoub”, Mém. Magistère, Univ. Batna, (2007) 135 p.
74. El Amrani, B. et Bendriss-Amraoui, M. “Effects of some properties of cedar forest soils on secondary roots of *Cedrus atlantica* Manetti”, J. For. Sci., 64, (2018) 506 – 513.
75. Slimani, S., Derridj, A. et Gutierrez, E., “Ecological response of *Cedrus atlantica* to climate variability in the Massif of Guetiane (Algeria)”, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) Forest Systems 2014 23(3), (2014) 448 - 460.
76. Djemouai, K., “Contributions climatiques temporaires”. ISBN 978-9947-0-4267-0. DL 863, (2015) 110 p.
77. GIEC, “Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse”. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d’évaluation du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat, GIEC, Genève, Suisse, (2014) 161 p.
78. Weller, D.M., Raaijmakers, J.M., McSpadden Gardener, B.B. et Thomashow, L.S., “Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens”, Annu. Rev. Phytopathol, 40, (2002) 309 – 349.
79. Métral R., “Étude de la diversité de la pédofaune dans les systèmes agroforestiers”, Programme CAS DAR Agroforesterie 2006/08, Recherche et développement (Décembre 2007) 46 p.
80. Hedde, M., “Etude de la relation entre la diversité des macro-invertébrés et la dynamique de la matière organique des sols limoneux de Haute-Normandie”, Thèse Univ. Rouen, Fr., (2010) 198 p.

81. Lavorel, S., Sarthou, J.P., Carré, G., Chauvel, B., Cortet, J., Dajoz, I., Dupraz, C., Farruggia, A., Lavergne, S., Liagre, F., Lumaret, J.P., Quétier, F., Roger-Estrade, J., Schmid, B., Simon, S., Steinberg, C., Tichit, M., Vaissière, B., Van Tuinen, D. et Villenave, C., "Intérêts de la biodiversité pour les services rendus par les écosystèmes", Chapitre 2, ESCo "Agriculture et biodiversité", (SD) 266 p.
82. Bariteau, M. et Ferrandes, P., "Les Cèdres. In : Amélioration des espèces végétales cultivées, chap. 8 : les espèces forestières", A. Gallais, H. Bannerot, Eds., (1992) 733 – 743.
83. Gachi, M., "Note sur la présence en Algérie de la processionnaire du Cèdre : *Thaumetopoea bonjeani* Powell (*Lepidoptera, Thaumetopoeidae*)". Ann. Rech. For., T (27), (1994) 527 - 537.
84. Germain, J.F., Boutte, B., Boivin, T. et Chalon, A., "Un nouveau parasite dans les forêts de cèdre de l'Atlas : *La cochenille des aiguilles Dynaspidiotus regnier*", Forêt méditerranéenne t. xxxv, n° 1, (mars 2014) 53 – 58.
85. Mouna, M., "Possibilités et époque de lutte contre la tordeuse du cèdre *Acleris undulana* Walsingham (Lep. Tortricidae, Tortricinae)", Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, 10, (1986) 209 - 210.
86. Ladjal, M., Deloche, N., Huc, R. et Ducrey, M., "Effects of soil and air drought on growth, plant water status and leaf gas exchange in three Mediterranean cedar species: *Cedrus atlantica*, *C. brevifolia* and *C. libani*, *Trees structure and function*", Vol 21, N° 2, (2007) 201 - 213.
87. Fabre, J.P., Mouna, M., Du Merle, P. et Benhalima, S., "Le point sur certains ravageurs du Cèdre de l'Atlas en Afrique du Nord, en France et en Europe", Forêt méditerranéenne t. xx, n ° 4, (décembre 1999) 203 – 218.
88. Malki, H., "Contribution à l'étude de l'influence du climat des facteurs physiques sur la végétation naturelle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus Atlantica* Manetti) dans les monts du Belezma (Algérie)", Thé. Doc. Uni. Paris-Sorbonne, (1992) 187 p.
89. Bakry, M. et Abourouh, M., "La fonte des semis - premiers résultats sur les pertes en pépinières forestières", Annales Recherche Forestière Maroc, T. 2 6, (1992) 113 - 126.



90. Abourouh, M. et Morelet, M., "Les champignons parasites du Cèdre de l'Atlas en Afrique du Nord et en France", forêt méditerranéenne t. xx, n°4, (décembre 1999) 198 – 202.
91. Meddour-Sahar, O. et Derridj, A., "Bilan des feux de forêts en Algérie : analyse spatiotemporelle et cartographie du risque (période 1985-2010)", Rev. Science et changements planétaires / Sécheresse, Vol. 23, n°2, (Avril 2012) 133 – 141.
92. El Yousfi, M., "La santé du Cèdre de l'Atlas au Maroc". Ann. Rech. For., T. (27): (1994) 593 - 611.
93. Mazirt, O., "Contribution à l'étude des facteurs de dégradation de la cédraie du Parc National de Bélezma". Thèse. Ing. Uni. INA Alger. (1991) 34 p.
94. Zine El Abidine, A., "Le dépérissement des forêts au Maroc : analyse des causes et stratégie de lutte", Sécheresse n° 14, Vol 4 : (2003) 209 - 218.
95. Niederlender, L. et Badeau, V., "Arboretum et dendroécologie. Dépérissement du cèdre", Collection Edytem, n° 11, (2010) 47 - 54.
96. Peñuelas, J., Gracia, C., Alistair, Jump, I.L., Carnicer, J., Coll, M., Illoret, F., Yuste, J.C., Estiarte, M., Rutishauser, T., Ogaya, R., Iltis, J. et Sargans, J., "Intégration des effets du changement climatique sur les forêts méditerranéennes : observation, expérimentation, modélisation et gestion". Forêt méditerranéenne t. xxxi, n°4, (2010) 351 - 356.
97. Zaremski, A., Bakkali-Yakhlef, S., Chaintreuil, C., Abbas, Y., Prin, Y., Abourouh, M., Ducouso, M. et Baudasse, C., "Caractérisation moléculaire du M'Jej, agent de dépérissement des cédraies marocaines". Bois et Forêts des Tropiques, n°291 (1), (2007) 67 - 73.
98. Battisti, A. et Jactel, H., "Populations d'insectes ravageurs et changement climatique dans les forêts du bassin méditerranéen", Forêt Médit., t.xxxi, n°4, (2010) 377 - 383.
99. Kherchouche, D., Kalla, M., Gutierrez, E., Briki, A. et Hamchi A., "La sécheresse et le dépérissement du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif du Belezma", Secheresse 24 : (2013) 129 - 137.
100. Messaoudene, M., Tafer, M., Abderrahmani S., et Guibal F., "Le dépérissement du cèdre dans le Bélezma, Impact des changements climatiques", Com. Séminaire Inter. sur le cèdre, Batna, (décembre 2011) 13 - 14.

101. Touchan, R., Anchukaitis, K.J., Meko, D.M., Sabir, M., Attalah, S. et Aloui, A., "Spatiotemporal drought variability in north western Africa over the last nine centuries", *Clim. Dyn.* 37, (2011) 237 – 252.
102. Becker, M. et Levy, G., "Le dépérissement du sapin dans les Vosges : rôle primordial de déficits d'alimentation en eau", *Ann. Sci. For.* 44, (1987) 403 - 416.
103. Demarteau, M., "Réponse de *Cedrus atlantica* aux changements climatiques passés et futurs", *Mém. Lic. Sc. Géol., Univ. Liège, Fac. Sciences (Belgique)*, (2006) 60 p.
104. Megdoud, A., Messaoudene, M. et Dahmani-Megrerouche, M., "Vulnérabilité des forêts de cèdre algériennes aux changements climatiques". *inter. conf. on advances in plant sciences, nov. 14-18, Chiang Mai, Thaïlande, poster*, (2012).
105. Akli, A., "Etude comparative de la croissance radiale et des variables dendrométriques (hauteur, diamètre) des reboisements de Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) du Djurdjura et de Chréa (Blida)", *Th. Mag. Univ. Tizi-ouzou*, (2015) 132 p.
106. Faurel, L., "Note sur la cédraie de l'Atlas de Blida (Algérie), ses sols et ses associations végétales", *C.R. Conf. Pédol. Médit.*, 1-20, Alger-Montpellier, (mai 1947) 474 - 477.
107. Meddour, R., "Bioclimats, étages et séries de végétation de l'Atlas Blidéen (Algérie)", *Phytocoenologia*, 32 (1), (2002) 101 – 128.
108. Aliouche, Y., "Impact du changement climatique sur la fluctuation piézométrique de la nappe de la Mitidja", *Mémoire Master, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique, Blida (Algérie)*, (2016) 70 p.
109. Sarmoum, M., Navarro-Cerrilo, R. et Guibal, F., "Bilan actuel et retrospectif du dépérissement du Cèdre de l'Atlas dans le Parc National de Theniet El Had (Algérie)", *Bois et Forêts des Tropiques*, 342, (2019) 29 - 40.
110. Dajoz, R. (1985). "*Précis d'Ecologie*. Ed. Dunod, Paris, 505 p.
111. Lahrech, B. et Khenafif, H., "Evaluation de la biodiversité du Parc National de Chréa (Blida)", *Mém. Master Sc.Agro.Université de Blida 1*, (2018) 89 p.
112. Seltzer, P., "Climat de l'Algérie", *Inst, nati, météo, phys., Globe de l'Algérie, Alger*, (1946) 219 p.

113. Long, G., "Diagnostic phyto-écologique et aménagement du territoire, T1: Principes généraux et méthodes: Recueil, analyse, traitements et expression cartographique de l'information", Ed. Masson et Cie, Paris, (1974) 252 p.
114. Ozenda, P., "Les végétaux dans la biosphère", Doin Editeurs, Vol. 57 Num. 1, Paris, (1982) 83 – 84.
115. Bagnouls, F. et Gaussen, H., "Saisons sèches et les indices xérothermiques", Bull. Soc. Hist. Nat., vol 8, (1953) 193 - 239.
116. Stewert, P., "Climat de l'Algérie", Institut météo. Phy. Globe de l'Algérie, Alger, (1969) 219 p.
117. Rabhi, K., Akli, A., Djouhri, A., Yahy, N., Boudedja, S. et Messaoudene, M., "Bilan et croissance des reboisements de cèdre de l'Atlas, *Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière, en Algérie : cas du Djurdjura et de l'Atlas blidéen", Bois et Forêts des Tropiques, 337, (2018) 3-15.
118. Sbabdji, M., "Étude des infestations de la cédraie de Chréa par la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* Schiff.: description spatiotemporelle et interaction arbre-défoliateur", Thèse de doctorat, ENSA, El Harrach, Alger, Algérie.. (2012) 115 p.
119. Sbabdji, M., Lambs, L., Haddad, A. et Kadik, B., "Effect of periodic defoliations by *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. on radial growth in cedar woodland in Chréa, Algeria", Rev. Ecol. (Terre et Vie), 70 (4), (2015) 371 – 386.
120. Ouadah, N., "Estimation de la valeur économique et sociale des services rendus par les écosystèmes forestiers méditerranéens – Algérie, Parc National de Chréa", Algérie, Plan Bleu/FAO, (2016) 54 p.
121. Dalmaso, A., "Méthodes simples d'extraction des nématodes du sol", Rev. Ecol. Biol. Sol, 3 (1966) 473 - 478.
122. Jaccob, J.J. et Middepijns, W.C.T., "Fascicule de détermination des principaux nématodes phytoparasites au stéréoscope", cours de nématologie, TSP, Vol. 2, Niamey, Niger, (1988) 175 p.
123. Merny, G et Luc, M., "Les techniques d'échantillonnage des peuplements de nématodes dans le sol", In: Problèmes d'écologie, Paris, France, (1969) 237 - 272.

124. Lamotte, M. et Bourliere, F., "Problèmes d'écologie : l'échantillonnage du peuplement d'animaux en milieu terrestre", Ed. Masson et Cie, Paris, (1969) 1 - 100.
125. Vanne, R. G., "Extracteur automatique de microfaune du sol à progression, pour étude écologique", Rev. Ecol. Biol. Sol., t. I, 3, (1964) 421 - 441.
126. Coineau, Y., "Introduction à l'étude des microarthropodes du sol, Document pour enseignement pratique de l'écologie", Dept. Zool. IAV Hassan II, Rabat, (1974).
127. Bachelier, G., "La faune des sols, son écologie et son action", V.R.S.T.M., Init. Doc. Tech. 38, (1978) 391.
128. Ponge, J.F., "Les collemboles, indicateurs du type d'humus en milieu forestier, Résultats obtenus au sol de Paris", Acta Ecologica. Gener, 4(4), (1983) 359 - 374.
129. El Alami Idrissi, N., "Etude préliminaire de la litière de la subéraie", Dept. Zool., IAV Hassan II, Rabat, Article rapp (Article actualisé), (1987) 10.
130. Ponge, J. F., "Biodiversité et biomasse de la faune du sol sous climat tempéré", Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France, (2000) 129 - 134.
131. Bayartogtokh, B., "Tree new soil mites of the genus *Epidamaeus* (*Acari*, *Oribatida*, *Damaeidae*) from Mongolia", Zoosystema (France), V. 23 (1), (2001) 29 – 49.
132. Deschaseaux, A. et Ponge, J.F., "Evolution de la composition des profils humiques près de la base du tronc d'un chêne (*Quercus petraea*) (Mattus)", European journal of soil Biology (France), V. 37 (1), (2001) 9 - 16.
133. Satanuszek, S., "Role of epiger macro arthropod predators in the regulation of abundance and biomass of saprophagous nematode on grass litter of meadow", Polish journal of ecology (Poland), V. 49 (1), (2001) 45-57.
134. Baize, D., "Petit lexique de pédologie", Paris : INRA éditions, (2004) 271 p.
135. El Alami-Idrissi, N., La faune du sol: reconnaissance et biologie des principaux groupes, Rev. Mar. Sci. Agron. Vét. (2013) 3: (2013) 60 - 66.
136. El Alami Idrissi, N., "Faune de la litière de la subéraie", Article actualisé, Dept. Zool., IAV Hassan II, Rabat, (2006) 10 p.
137. Duval, O., Richard, G. et Baize, D., "Les sols et leur structure", Paris : Editions Quae, Collection Synthèses (2013) 263 p.

138. Horn, K.J., McMillan, B.R. et St Clair, S.B., "Expansive fire in Mojave Desert shrubland reduces abundance and species diversity of small mammals", *Journal of Environments*, 77, (2012) 54 – 58.
139. Colwell, R. K., Chao, A., Gotelli, N.J., Lin, S.Y., Mao, C. X., Chazdon, R. L. et Longino, J.T., "Models and estimators linking individual-based and sample-based rarefaction, extrapolation and comparaison of assemblages", *Journal of Plant Ecology*, 5, (2012) 3 - 21.
140. Hammer, O., Harper, D.A.T. et Ryan, P.D., "PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis", *Palaeont. Electron.* 4(1) (2001) 9 p.
141. Hadjoudj, M., Souttou, K. et Doumandji, S., "Diversity and richness of rodent communities in various landscapes of Touggourt Area (Southeast Algeria)", *Acta Zoologica Bulgarica*, 67, (2015) 415 – 420.
142. Krebs, J.C., "Ecological Methodology", 2<sup>nd</sup> Ed. Harper & Row, New York, NY, USA. (1998) 620 p.
143. Fortuner, R. et Merny, G., "Les nématodes parasites les racines associés au riz en Basse-Casamance (Sénégal) et en Gambie", *Cahier ORSTOM, Série Biologique*, 21 (1973) 3 - 30.
144. Fournier, J., Bonnot-Courtois, C. Paris, R. et Le Vot M., "Analyses granulométriques : Principes et méthodes", CNRS, Dinar, (2012) 100 p.
145. Otobe, K., Itou, K. et Mizukubo, T., "Micro-moulded substrates for the analysis of structure-dependent behaviour of nematodes", *Nematology*, 6, (2004) 73 - 77.
146. Frontier, S., "Stratégie d'échantillonnage en écologie", Ed. Masson, Paris et Les Presses de l'Université de Laval, (1983) 494 p.
147. Lichtenthaler, H.K., "Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes", *Methods in Enzymology*, Volume 148, (1987) 350 - 382.
148. Naidu, B.P., "Separation of sugars, polyols, proline analogues, and betaines in stressed plant extracts by high performance liquid chromatography and quantification by ultra violet detection", *Australian Journal of Plant Physiology*, 25 (7) , (1998) 793 – 800.

149. Singh, T.N., Aspinall, H.D., Paleg, L.G. et Bogge, S.F., "Stress Metabolism II: Changes in proline concentration in excised plant tissues", *Aust. J. Biol. Sci.*, 26, (1973) 57- 63.
150. Dubois, M.K.A, Gilles, Y.K et Hamilton, P.A., "Colometric method for determination of sugars and related substance", *Anal. & Chem. Jour*, 28, (1956) 350 - 356.
151. Bradford, M.M., "A rapide and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principale of protein-dye binding", *Analytical Biochemistry*, 72, (1976) 248 - 254.
152. Ammar, M., Barbouche, N. et Benhamouda, M.H., "Action des extraits de composés des feuilles de *Cestrum parquii* et d'*Olea europea* sur la longévité et la croissance du criquet pèlerin" *Schistocerca gregaria*, *Med.*", *Fac. Landbouww Université Gent*, 60/30a, (1995) 831 - 863.
153. Oomah, B. D., Corbé, A. et Balasubramanian, P., "Antioxidant and Anti-inflammatory Activities of Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Hulls", *J. Agric. Food Chem.*, 58, 14, (2010) 8225 - 8230.
154. Škerget, M., Kotnik, P., Hadolin, M., Rižner Hraš, A., Simonič, M. et Knez Z., "Phenols, proanthocyanidins, flavones and flavonols in some plant materials and their antioxidant activities", *Food Chemistry*, Volume 89, Issue 2, (February 2005) 191 - 198.
155. Motomura, I., "Statistical study of ecological populations", (in japanese), *Doobutugaku Zossi*, 44, (1932) 379 – 383.
156. Iganaki, H., "Mise au point de la loi de Motomura et essai d'une écologie évolutive", *Vie Milieu*, 18, (1967) 153 – 166.
157. SPSS Inc., "SYSTAT 4.00 for windows", statistics and graphics (2012).
158. Korboulewsky, N., Perez, G. et Chauvat, M., "How tree diversity affects soil fauna diversity: A review", *Soil Biol. Biochem*, 94, (2016) 94 – 106.
159. García Calderón, N.E., Ibáñez Huerta, A., Alvarez Arteaga, G., Krasilnikov, P.V., et Hernández Jiménez, A., "Soil diversity and properties in mountainous subtropical areas, in Sierra Sur de Oaxaca, Mexico", *Canadian Journal of Soil Science*, 86 (1), (2005) 61 – 76.
160. Coyle, D. R., Nagendra, U. J., Taylor, M. K., Campbell, J. H., Cunard, C. E., Joslin, A. H. et Callaham, M. A., "Soil fauna responses to natural disturbances, invasive species, and global climate change: Current state of

- the science and a call to action”, *Soil Biology and Biochemistry*, Elsevier Ltd, (Juillet 2017) 116 – 133.
161. Quezel, P., “La région méditerranéenne française et ses essences forestières : Signification écologique dans le contexte circum-méditerranéen”. *Forêt Médit.* 1 (1), (1979) 7-18.
  162. Achhal, A., Akabli, O., Barbero, M., Benabid, A., M'hirit, O., Peyre, C., Quezel, P. et Rivas-Martinez, S., “A propos de la valeur bioclimatique et dynamique de quelques essences forestières au Maroc”, *Ecol. Medit.* 5, (1980) 211 - 249.
  163. Rivas-Martinez, S., “Les étages bioclimatiques de la végétation de la péninsule ibérique”, *Annales Jard. Bot. Madrid* 37 (2), (1981) 215 - 268.
  164. Barbero, M., Quézel, P. et Rivas-Martinez, S., “Contribution à l'étude des groupements forestiers et préforestiers du Maroc”, *Phytocoenologia*, 9: (1981) 311 - 412.
  165. Griffiths, B.S. et Philippot, L., “Insights into the resistance and resilience of the soil microbial community”, *Blackwell Publishing Ltd., FEMS. Microbiol Rev*, 37, (2013) 112 - 129.
  166. Pey, B., “Contribution de la faune du sol au fonctionnement et à l'évolution des Technosols”, Thèse de doctorat. Laboratoire Sols et Environnement. Nancy Université, INPL, (2010) 303 p.
  167. Lindhe, A. et Lindelöw, Å., “Cut high stumps of spruce, birch, aspen and oak as breeding substrates for saproxylic beetles”. *Forest Ecology and Management*, 203, (2004) 1 – 20.
  168. Tikkanen, O.P., Martikainen, P., Hyvärinen, E., Junninen, K. et Kouki, J., “Red-listed boreal species of Finland: associations with forest structure, tree species and decaying wood”. *Annales Zoologici Fennici*, 43 (2006) 373 – 383.
  169. Barbier, S., Gosselin, F. & Balandier, P., “Influence of tree species on understory vegetation diversity and mechanisms involved - A critical review for temperate and boreal forests”, *Forest Ecology and Management*, 254, (2008) 1 – 15.
  170. Janssen, P., Fortin, D. et Hébert, C., “Beetle diversity in a matrix of old-growth boreal forest: influence of habitat heterogeneity at multiple scales”. *Ecography*, 32, (2009) 423 – 432.

171. Janssen, P., Hébert, C. et Fortin, D., “Biodiversity conservation in old-growth boreal forest: black spruce and balsam for snags harbour distinct assemblages of saproxylic beetles”, *Biodiversity and Conservation*, 20, (2011) 2917 – 2932.
172. Gossner, M.M., Wende, B., Levick, S., Schall, P., Floren, A., Linsenmair, K.E., Steffan-Dewenter, I., Schulze, E.D. et Weisser, W.W., “Deadwood enrichment in European forests – Which tree species should be used to promote saproxylic beetle diversity?”, *Biological Conservation*, 201, (2016) 92 – 102.
173. Nadkarni, N.M. et Longino, J.T., “Invertebrates in Canopy and ground organic matter in a neotropical montana forest, Cost Rica”, *Biotropica* 22(3), (1990) 286 – 289.
174. Satchell, D. P. N., “The effectiveness of Brønsted–Lewis acid combinations under Friedel–Crafts conditions, investigated by hydrogen isotope exchange”, *Journal of the Chemical Society* (1960) 4388 - 4395.
175. Bezkorovainaya, I. N., et Yashikhin, G. I., “Effects of soil hydrothermal conditions on the complexes of soil invertebrates in coniferous deciduous forest cultures”, *Russian Journal of Ecology*, 34(1), (2003) 52 – 58.
176. Dazzi, C., Massa, B., Veca, D. la M., et Vacante, G., “Pedo-mesofauna activity as soil quality indicator in a forest Mollisol, Man and Soil at the Third Millennium”, *Proceedings International Congress of the European Society for Soil Conservation, Valencia, Spain, 28/03-1/04, 2000. Vol. 1*, (2002) 871 – 885.
177. Ladjali, B., “Influence des caractéristiques physicochimiques d’un sol sous Cèdre (*Cedrus Atlantica* Manetti 1855) sur la diversité faunique dans le Parc National de Chrèa”, *Univ. Blida 1*, (2018) 55 p.
178. Jones, C.G., Lawton, J.H. et Moshe Shachak, M., “Organisms as Ecosystem Engineers”, *Ecosystem Management*, (1994) 130 – 147.
179. Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., et Blouin, M. “Soil invertebrates and ecosystem services”, *European Journal of Soil Biology*, 42 (2006) S3 – S15.
180. Lavelle, P. et Spain, A.V., “Soil ecology”. Kluwer academic publishers, Dordrecht, (2001) 654 p.



181. Six, J., Bossuyt, H. et Deneff, S.K., "A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics", *Soil and Tillage Research*, Volume 79, Issue 1, (September 2004) 7 – 31.
182. Bossuyt, H., Six, J. et Hendrix, P.F., "Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts", *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 37, Issue 2, (February 2005) 251 – 258.
183. Mori, K., Bernier, N., Kosaki, T. et Ponge, J.F., "Tree influence on soil biological activity: what can be inferred from the optical examination of humus profiles?", *European Journal of Soil Biology*, Elsevier, 45 (4), (2009) 290 - 300.
184. Arpin, K.A., Losego, M.D. et Braun, P.V., "Electrodeposited 3D Tungsten Photonic Crystals with Enhanced Thermal Stability", *Chem. Mater.* 23, 21, (2011) 4783 - 4788.
185. Kraft, N.J.B., Adler, P.B., Godoy, O., James, E.C., Fuller, S. et Levine, J.M., "Community assembly, coexistence and the environmental filtering metaphor", *Functional Ecology*, 29, (2014) 592 – 599.
186. Ferreira, C.R., Fernandes Correia, M.E., Camara, R., Resende, A.S, Cunha dos Anjos, L.H. et Pereira, M.G., "Soil fauna changes across Atlantic Forest succession", *Comunicata Scientiae* 9(2), (2018) 162 – 174.
187. Qiu, L., Yin, X. et Jiang, Y., "Contributions of soil meso- and microfauna to nutrient release during broadleaved tree litter decomposition in the changbai mountains", *Environmental Entomology*, 48(2), (2019) 395 – 403.
188. Bezkorovaynaya, I. N., Egunova, M. N. et Taskaeva, A.A., "Soil invertebrates and their trophic activity in 40-year-old forest stands", *Contemporary Problems of Ecology*, 10(5), (2017) 524 – 533.
189. Moradi, J., Mudrak, O., Kukla, J., Vicentini, F., Šimackova, H. et Frouz, J., "Variations in soil chemical properties, microbial biomass, and faunal populations as related to plant functional traits, patch types, and successional stages at Sokolov post-mining site - A case study", *European Journal of Soil Biology*, 83, (2017) 58 – 64.
190. Perry, D.A., Griffiths, R.P., Moldenke, A.R. et Madson, S.L., "Abiotic and Biotic Soil Characteristics in Old Growth Forests and Thinned or Unthinned Mature Stands in Three Regions of Oregon", *Diversity*, 4, (2012) 334 - 362.

191. Cornic, G., "Drought stress inhibits photosynthesis by decreasing stomatal aperture - not by affecting ATP synthesis", *Trends Plant Sci*, 5, (2000) 187–188.
192. Zhu, JK., "Salt and drought stress signal transduction in plants". *Annu. Rev. Plant. Biol.*, 53, (2002) 247 – 273.
193. Li, H.B., Wong, C.C., Cheng, K.W. et Chen, F., "Antioxidant properties in vitro and total phenolic contents in methanol extracts from medicinal plants", *LWT-Food Sci Techn*, 41(3), (2008) 385 - 390.
194. Wang, H., Chen, G. et Zhang, H., "Identification of QTLs for salt tolerance at germination and seedling stage of *Sorghum bicolor* L. *Moench* .*Euphytica*", 196(1), (2014) 117 – 127.
195. Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdorran, F. et Xie, Y., "Heavy metal stress and some mechanism of plant defense response", *Sci World J*, e756120, (2015).
196. Trinchant, J.C., Boscari, A., Spennato, G., Van de Sype, G. et Le Rudulier, D., "Proline betaine accumulation and metabolism in alfalfa plants under sodium chloride stress. Exploring its compartmentalization in nodules". *Plant Physiol*, 135(3), (2004) 1583 – 1594.
197. Ben Khaled, L., Gómez, A., Honrubia, M. et Oihabi, A., "Effet du stress salin en milieu hydroponique sur le trèfle inoculé par le *Rhizobium*", *Agronomie, EDP Sciences*, 23 (7), (2003) 553 - 560.
198. Bhatt, I.D., Rawat, S. et Rawal, R.S., "Antioxidants in medicinal plants", *Biotechnology for Medicinal Plants*, Berlin: Springer, (2013) 295 – 326.
199. Hassani, M., Chabou, M.C., Hamoudi, M. et Guettouche, M.S., "Index of extraction of water surfaces from Landsat 7 ETM+ images", *Arab J Geosci*. 8, (2014) 3381 – 3389.
200. Ghezali, D., "Systématique et bioécologie des acariens du sol (Acari-Oribatida) en Algérie", Thèse Doct. ENSA, El Harrach, Alger, (2012) 144 p.