



## AVIS DE SOUTENANCE DE THESE

Le Doyen de la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz –Fès – annonce que

Mr **BASSOUYA MOHAMMED**  
Soutiendra : le **Vendredi 28/11/2025 à 09H00**  
Lieu : **FSDM – Centre Visioconférence**

Une thèse intitulée :

**Biologie de la reproduction, caractérisation morpho-écologique, valorisation phytochimique, et classification assistée par intelligence artificielle de *Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica* et *Pistacia terebinthus* L. dans le Moyen Atlas marocain**

En vue d'obtenir le **Doctorat**

FD : **Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable**  
Spécialité : **Biologie et Physiologie végétales**

Devant le jury composé comme suit :

Nom et prénom	Etablissement	Grade	Qualité
BENYAHYA Mohammed	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	PES	Président
HMOUNI Driss	Faculté des Sciences, Kénitra	PES	Rapporteur & Examineur
EL ARABI Ilham	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	PES	Rapporteur & Examineur
ZAIR Touriya	Faculté des Sciences, Meknès	PES	Rapporteur & Examineur
GUEMMOUH Raja	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	PES	Examineur
BOUSTA Dalila	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	PES	Examineur
BARI Amina	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	PES	Directeur de thèse



## Résumé :

Dans une perspective de conservation et de l'exploitation durable des ressources forestières des zones arides et semi-arides du Maroc, cette thèse se concentre sur une étude pluridisciplinaire des deux espèces du genre *Pistacia*, originaires du Moyen Atlas marocain. En effet, le genre *Pistacia*, réputé pour son importance écologique, économique et médicinale, se caractérise par une capacité exceptionnelle d'adaptation aux conditions climatiques extrêmes. Cependant, certaines espèces, telles que *Pistacia atlantica* Desf. et *Pistacia terebinthus* L., ainsi que les écosystèmes qu'elles constituaient autrefois, subissent un déclin significatif en raison de la dégradation environnementale et de la surexploitation.

Les travaux menés ont d'abord porté sur la germination des graines de trois populations du *P. atlantica*. Neuf traitements pré-germinatifs ont été testés, incluant la scarification mécanique, l'application d'acide gibbérellique et la stratification à froid. Les résultats ont montré que la scarification mécanique est la plus efficace, avec un taux de germination dépassant 80 % pour certaines provenances, contre moins de 40 % pour les autres traitements. Ces résultats soulignent l'importance de la provenance des graines et des techniques adaptées pour optimiser la propagation et soutenir les programmes de reboisement de cette espèce menacée.

L'analyse dendrométrique et morphologique réalisée sur *P. atlantica* et *P. terebinthus* dans trois zones bioclimatiques du Moyen Atlas a mis en évidence des différences significatives entre les deux espèces. L'étude de 27 variables qualitatives et quantitatives a révélé que la surface du houppier, le nombre de troncs, la taille et la densité stomatique, ainsi que la forme des cellules épidermiques et la présence de trichomes, constituent des critères discriminants. L'analyse en composantes principales (ACP) a confirmé une différenciation interspécifique marquée, expliquant plus de 60 % de la variance observée, mettant ainsi en évidence la diversité morphologique et l'adaptation écologique de ces taxons. Sur le plan phytochimique, les huiles essentielles extraites des feuilles des deux espèces ont montré une forte variabilité régionale. L'analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) a permis d'identifier entre 23 et 98 composés selon l'espèce et la provenance. Cependant chez *P. atlantica*, le germacrène D est le constituant dominant, tandis que chez *P. terebinthus*, l' $\alpha$ -pinène prédomine dans les zones arides et le terpinen-4-ol dans les zones subhumides. Les tests d'activité antioxydante réalisés par les méthodes DPPH et FRAP ont révélé une variabilité importante selon les origines. Les valeurs les plus faibles d'IC<sub>50</sub>, traduisant une activité antioxydante élevée, ont été obtenues pour *P. atlantica* (EOPAA1) avec  $0.414 \pm 0.010$  mg/mL, alors que les plus fortes ont été observées pour *P. terebinthus* (EOPT3) avec  $4.149 \pm 0.009$  mg/mL. Les résultats du test FRAP ont confirmé cette tendance, avec des valeurs d'EC<sub>50</sub> de  $2.132 \pm 0.034$  mg/mL pour *P. atlantica* contre  $8.644 \pm 0.549$  mg/mL pour *P. terebinthus*. Ces écarts traduisent une activité antioxydante plus importante des huiles provenant des zones arides, probablement en lien avec la biosynthèse accrue de composés phénoliques et terpéniques dans des conditions de stress climatique. Les analyses de docking moléculaire ont mis en évidence des interactions entre certains composés majeurs notamment le germacrène D, l' $\alpha$ -pinène et le terpinen-4-ol et des enzymes antioxydantes clés, confirmant la cohérence entre les observations *in vitro* et le potentiel biologique de ces molécules. Les essais antimicrobiens ont révélé une activité significative des huiles essentielles, variable selon les souches testées. Les huiles de *P. atlantica* (EOPAA2) ont montré une inhibition notable contre *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa* et *Candida albicans*, tandis que *P. terebinthus* (EOPT3) s'est distinguée par une forte activité contre *Staphylococcus aureus* (zone d'inhibition :  $25.7 \pm 1.57$  mm). Les valeurs minimales de concentration inhibitrice (CMI) ont atteint 0.47 mg/mL pour *S. aureus* et *C. albicans*, indiquant une sensibilité élevée des germes Gram positifs et des levures pathogènes.

Enfin, l'application de modèles d'apprentissage profond tels que ResNet50, EfficientNet-B0 et DenseNet201 sur des images foliaires a permis une identification précise des espèces *Pistacia* avec des taux de précision supérieurs à 95 %, démontrant la pertinence de l'intelligence artificielle pour pallier les difficultés taxonomiques du genre.

Ces travaux apportent une contribution significative à la connaissance écologique, morphologique et biochimique des *Pistacia* marocains. Ils soulignent le potentiel de ces espèces pour la restauration des écosystèmes dégradés, la valorisation pharmaceutique et le développement d'une agroforesterie durable adaptée aux conditions climatiques du Maroc.

**Mots clés :** *Pistacia* spp., germination, variabilité, huiles essentielles, activité biologique, morphologie, Classification, intelligence artificielle, valorisation, Moyen Atlas.



## Reproductive Biology, Morphological and Phytochemical Characterization, Biological Activities, and Artificial Intelligence Assisted Classification of *Pistacia atlantica* subsp. *atlantica* and *Pistacia terebinthus* L. in the Middle Atlas of Morocco

### Abstract:

In the context of conserving and sustainably exploiting forest resources in the arid and semi-arid regions of Morocco, this thesis focuses on a multidisciplinary study of two *Pistacia* species native to the Middle Atlas. The genus *Pistacia*, renowned for its ecological, economic, and medicinal importance, is characterized by a remarkable capacity to adapt to extreme climatic conditions. However, certain species, such as *Pistacia atlantica* Desf. and *Pistacia terebinthus* L., along with the ecosystems they once dominated, are currently experiencing a significant decline due to environmental degradation and overexploitation.

The first part of this research investigated seed germination in three populations of *P. atlantica*. Nine pre-germination treatments were tested, including mechanical scarification, gibberellic acid application, and cold stratification. The results indicated that mechanical scarification was the most effective treatment, achieving germination rates exceeding 80% in some provenances, compared with less than 40% for other treatments. These findings highlight the importance of seed provenance and appropriate propagation techniques to optimize regeneration and support reforestation programs for this threatened species.

Dendrometric and morphological analyses of *P. atlantica* and *P. terebinthus* across three bioclimatic zones of the Middle Atlas revealed significant interspecific differences. The study of 27 qualitative and quantitative traits showed that canopy area, number of trunks, stomatal size and density, epidermal cell shape, and trichome presence were discriminating features. Principal Component Analysis (PCA) confirmed a clear interspecific differentiation, explaining more than 60% of the observed variance, thereby illustrating the morphological diversity and ecological adaptability of these taxa.

From a phytochemical perspective, essential oils extracted from the leaves of both species exhibited strong regional variability. Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS) analysis identified between 23 and 98 compounds depending on species and provenance. In *P. atlantica*, germacrene D was the dominant constituent, while in *P. terebinthus*,  $\alpha$ -pinene predominated in arid zones and terpinen-4-ol in subhumid areas. Antioxidant activity assays (DPPH and FRAP) revealed considerable variability among samples. The lowest IC<sub>50</sub> values indicating the highest antioxidant activity were recorded for *P. atlantica* (EOPAA1) at  $0.414 \pm 0.010$  mg/mL, whereas the highest were observed for *P. terebinthus* (EOPT3) at  $4.149 \pm 0.009$  mg/mL. FRAP results confirmed this trend, with EC<sub>50</sub> values of  $2.132 \pm 0.034$  mg/mL for *P. atlantica* and  $8.644 \pm 0.549$  mg/mL for *P. terebinthus*. These differences suggest higher antioxidant activity in oils from arid regions, likely linked to enhanced biosynthesis of phenolic and terpenic compounds under climatic stress.

Molecular docking analyses revealed interactions between major compounds particularly germacrene D,  $\alpha$ -pinene, and terpinen-4-ol and key antioxidant enzymes, confirming the consistency between *in vitro* observations and the biological potential of these molecules. Antimicrobial assays demonstrated significant activity of the essential oils, varying with the tested strains. *P. atlantica* oil (EOPAA2) showed marked inhibition against *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Candida albicans*, while *P. terebinthus* (EOPT3) exhibited strong activity against *Staphylococcus aureus* (inhibition zone:  $25.7 \pm 1.57$  mm). The minimum inhibitory concentration (MIC) values reached 0.47 mg/mL for *S. aureus* and *C. albicans*, indicating high sensitivity of Gram-positive bacteria and pathogenic yeasts.

Finally, the application of deep learning models such as ResNet50, EfficientNet-B0, and DenseNet201 to leaf images enabled accurate species identification, with precision rates exceeding 95%. This demonstrates the relevance of artificial intelligence in overcoming taxonomic challenges within the genus *Pistacia*.

Overall, this work provides a significant contribution to the ecological, morphological, and biochemical understanding of Moroccan *Pistacia* species. It highlights their potential for ecosystem restoration, pharmaceutical valorization, and the development of sustainable agroforestry systems adapted to Morocco's climatic conditions.

**Key Words :** *Pistacia* spp., germination, variability, essential oils, biological activity, morphology, classification, artificial intelligence, valorization, Middle Atlas.