



Contribution à l'étude de la chorologie locale et la chémo-géographie de *Rhanterium adpressum* Coss. & Dur.

Djilali Tahri

► To cite this version:

Djilali Tahri. Contribution à l'étude de la chorologie locale et la chémo-géographie de *Rhanterium adpressum* Coss. & Dur.. Botanique. Université Amar Telidji de Laghouat (Algérie), 2022. Français. NNT: . tel-03657843

HAL Id: tel-03657843

<https://hal.science/tel-03657843>

Submitted on 21 May 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ AMAR TÉLIDJI - LAGHOUAT
FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE



THÈSE DE DOCTORAT LMD

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN BIOLOGIE

OPTION : CONNAISSANCE ET VALORISATION DES PRODUITS NATURELS VIVANTS

Thème

**Contribution à l'étude de la chorologie locale et la
chémo-géographie de *Rhanterium adpressum* Coss. & Dur.**

Présentée et soutenue publiquement par :

DJILALI TAHRI

Le : 09/03/2022

Devant le Jury composé de :

GOURINE NADHIR	Professeur	Université Amar Télidji de Laghouat	Président
OUINTEN MOHAMED	Professeur	Université Amar Télidji de Laghouat	Directeur de thèse
EL HOUTI FATIHA	MCA	Université Amar Télidji de Laghouat	Co-Directeur de thèse
KAMELI ABDELKRIM	Professeur	École Normale Supérieure de Kouba	Examineur
BOUTAIBA SAAD	Professeur	Université Ziane Achour de Djelfa	Examineur
SIFI IBRAHIM	MCA	Université Amar Télidji de Laghouat	Examineur

Année universitaire 2020/2021

ملخص

Rhanterium adpressum هو نوع متوطن بالمناطق الجافة ومعروف بمميزاته البيوكيميائية والبيئية الهامة. تضمنت أهداف هذه الأطروحة دراسة التوزيع الجغرافي لهذا النوع تحت تأثير العوامل البيئية الحاضرة والمستقبلية، ثم دراسة التغير الكيميائي لزيوته العطرية وعلاقته بالخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة وكذا العوامل البيئية.

بينت نمذجة توزيع أنواع قبيلة *Inuleae* في الجزائر باستعمال برنامج MaxEnt أن 18 و 12 نوعا يتوزعون على التوالي في منطقتين كبيرتين مختلفتين مناخيا هما : التل متميزا بالتساقط المعتبر (14-18°م ، 400-1000 ملم) والصحراء متميزة بالمناخ الحار والجاف (-24 17°م ، 20-200 ملم). بينما أظهر الإسقاط على الظروف المستقبلية أن مواطن أنواع الصحراء ستكون أكثر قسوة بزيادة تصل إلى 20% في درجات الحرارة وتناقص في التساقط بين 11 إلى 15%.

سمحت نمذجة ثانية بتمييز منطقة توزيع *R. adpressum* عن مناطق توزيع الأنواع الجزائرية الأخرى : *R. suaveolens* و *R. intermedium*. ساهمت عوامل التساقط بأكثر من 55% في هذا النموذج ، وأظهرت منحنيات الاستجابة للعوامل المناخية وعامل الارتفاع أن *R. adpressum* يفضل المواطن ذات العلو المرتفع (74,888م) ، الأقل حرارة (65,18°م) مع معدل تساقط سنوي يصل إلى 140,72 ملم.

كشف تحليل تسع عينات من التربة عن طابع رملي 77-96% ، قلوي ، كلسي مع ناقلية كهربائية بين 0,2 و 1,8 د.س/م عند 20°م. خلال خمسة أشهر ، ساد التركيب الكيميائي عائلة الهيدروكربونات وحيدات التربين 70-90% متبوعة بوحدات التربين الكحولية 4,5-9,2% ، الهيدروكربونات نصف الثلاثية 1,6-9,9% والتربينات نصف الثلاثية الكحولية 3,4-7,2%.

إن دراسة عينات من مختلف المناطق أظهرت كميات معتبرة من الزيوت العطرية بين 7,2 و 20,9 مل\كغ، نسبا غالبية لعائلي الهيدروكربونات وحيدات التربين 22,7-69% والتربينات نصف الثلاثية الكحولية 4,4-42,1% ونسبا ضعيفة لعائلي وحيدات التربين الكحولية 1,8-13,6% والهيدروكربونات نصف الثلاثية 0,06-20,4%. سمح التحليل متعدد المتغيرات بتمييز مجموعتين كيميائيتين ساد في الأولى مركبان هما β -Pinène/ β -Myrcène وفي الثانية مركبان آخران هما β -Myrcène/*p*-Cymène. أظهر معامل الارتباط علاقة إيجابية للارتفاع والرطوبة النسبية وأخرى سلبية للحرارتين الدنيا والقصوى بالمجموعة الأولى ، وعلى العكس من ذلك مع المجموعة الثانية حيث أظهر علاقة سلبية مع الارتفاع والرطوبة وعلاقة إيجابية مع الحرارتين الدنيا والقصوى.

كلمات مفتاحية: *Rhanterium adpressum*، زيوت عطرية ، MaxEnt، تغير كيميائي.

Résumé

Le *Rhanterium adpressum* est une espèce endémique des régions arides, connue par ses potentiels biochimiques et écologiques importants. Les objectifs dans cette thèse étaient d'étudier la distribution géographique de cette espèce sous l'influence des conditions climatiques actuelles et futures. Puis, d'étudier la variabilité de la composition chimique des ses huiles essentielles en relation avec les propriétés physico-chimiques du sol et les facteurs environnementaux.

La modélisation de la distribution des espèces de la tribu des Inulées en Algérie par MaxEnt a montré que 18 et 12 espèces réparties respectivement dans deux grandes zones bioclimatiques différentes; le Tell caractérisé par des précipitations importantes (14-18°C, 400-1000 mm) et le Sahara caractérisé par un climat chaud et aride (17-24°C, 20-200 mm). La projection dans les conditions futures révèle que les habitats des espèces du Sahara seront beaucoup plus hostiles avec une augmentation de température allant jusqu'à 20 % et une diminution des précipitations de 11 à 15 %.

Une deuxième modélisation a permis de distinguer la zone de distribution de *R. adpressum* des zones de distribution des autres espèces algériennes (*R. suaveolens* et *R. intermedium*). Les facteurs de précipitations ont contribué à plus de 55% à ce modèle. Les courbes de réponses aux facteurs bioclimatiques et le facteur d'élévation montrent que *R. adpressum* préfère des habitats d'altitude élevée (888,74 m), moins chaud (18,65 °C) avec des précipitations annuelles moyenne de 140,72 mm.

L'analyse de 9 échantillons du sol montre un caractère sableux (77-96%), alcalin, calcaire avec une conductivité électrique entre 0,2 et 1,8 dS/m à 20 °C. La composition chimique en familles de terpénoïdes durant cinq mois a été dominée par des hydrocarbures monoterpéniques (70-90%) suivi par des monoterpènes oxygénés (4,5-9,2%), des sésquiterpènes hydrocarbures (1,6-9,9%) et des sésquiterpènes oxygénés (4,3-7,2%).

L'analyse des échantillons de différentes régions a montré des teneurs importants en huiles essentielles de 7,2-20,9 ml/kg, la dominance de la famille des hydrocarbures monoterpéniques (22,7-69 %) suivie par des sesquiterpènes oxygénés (4,4-42,1 %) et des faibles pourcentages des familles des monoterpènes oxygénés (1,8-13,6 %) et sesquiterpènes hydrocarbures (0,06-20,4 %). Avec l'analyse multivariée deux groupes chimiques ont été distingués. Le premier groupe est dominé par β -Pinène/ β -Myrcène et le deuxième groupe est dominé par β -Myrcène/*p*-Cymène. La corrélation a montré la relation positive de l'altitude et de l'humidité relative et négative de T_{min} et T_{max} avec le premier groupe contrairement au deuxième groupe où une relation positive avec T_{min} et T_{max} et une relation négative avec l'altitude et l'humidité relative a été enregistrée.

Mots clés : *Rhanterium adpressum*, huiles essentielles, MaxEnt, variabilité chimique.

Abstract

Rhanterium adpressum is an endemic species of arid regions, known for its important biochemical and ecological potential. The objectives in this thesis were to study the geographical distribution of this species under the influence of current and future climatic conditions. Then, to study the variability of the chemical composition of its essential oils in relation to the physico-chemical properties of the soil and the environmental factors.

Distribution modeling of Algerian *Inuleae* tribe species by MaxEnt showed that 18 and 12 species distributed respectively in two large different bioclimatic zones; the Tell characterized by significant precipitation (14-18 °C, 400-1000 mm) and the Sahara characterized by a hot and arid climate (17-24 °C, 20-200 mm). The projection with future conditions reveals that the habitats of Sahara species will be much more hostile with an increase in temperature of up to 20% and a decrease in precipitation between 11 and 15%.

A second model made it possible to distinguish the distribution zone of *Rhanterium adpressum* from the distribution zones of other Algerian species; *R. suaveolens* and *R. intermedium*. Precipitation factors contributed over 55% to this model. The response curves to bioclimatic factors and the elevation factor show that *R. adpressum* prefers high altitude habitats (888.74 m), less warm (18.65 °C) with an average annual precipitation of 140.72 mm.

Analysis of nine soil samples shows a sandy (77-96%), alkaline, limestone character with an electrical conductivity between 0.2 and 1.8 dS/m at 20 °C. The chemical composition in terpenoids families for five months was dominated by monoterpene hydrocarbons (70-90%) followed by oxygenated monoterpenes (4.5-9.2%), hydrocarbon sesquiterpenes (1.6-9.9%) and oxygenated sesquiterpenes (4.3-7.2%).

Analysis of samples from different regions showed high essential oil contents of 7.2-20.9 ml/kg, the dominance of the family of monoterpene hydrocarbons (22.7-69 %) followed by oxygenated sesquiterpenes (4.4-42.1 %) and the low percentages of the families of oxygenated monoterpenes (1.8-13.6 %) and sesquiterpenes hydrocarbons (0.06-20.4 %). With multivariate analysis, two chemical groups were distinguished of which the first group is dominated by β -Pinene/ β -Myrcene and the second group is dominated by β -Myrcene/*p*-Cymene. The correlation showed the positive relationship of altitude and relative humidity and negative relationship of Tmin and Tmax with the first group unlike the second group where a positive relationship with Tmin and Tmax and a negative relationship with altitude and relative humidity were noted.

Keywords : *Rhanterium adpressum*, essential oils, MaxEnt, chemical variability.

AVANT-PROPOS

Ce travail est une continuité des travaux réalisés par Dr. EL HOUITI FATIHA dans l'objectif de contribuer à la connaissance de la plante endémique saharienne *Rhanterium adpressum* et la valorisation de ses potentiels biochimiques.

C'est avec Pr OUINTEN MOHAMED et Dr ELHOUITI FATIHA que l'encadrement scientifique de ce travail a été assuré et développé par des questions et des discussions fructueuses. Je tiens à leur exprimer ma profonde reconnaissance, mon respect, ma gratitude et mes remerciements.

Un grand merci aux membres du jury d'avoir gentiment accepté d'évaluer mon travail. Merci donc à Monsieur GOURINE NADHIR, à Monsieur KAMELI ABDELKARIM, à Monsieur BOUTAIBA SAAD et à Monsieur SIFI IBRAHIM.

Au Pr YOUSFI MOHAMED directeur du Laboratoire des Sciences Fondamentales pour la disponibilité, le soutien et les conseils scientifiques.

À SEBGAGUI ABDELKADER pour son soutien et son enthousiasme à l'égard de mes travaux. Merci pour tout..

Un grand merci également à Monsieur ELHOUITI BADREDDINE et Monsieur ELHOUITI ABDELKADER pour leur aide dans la réalisation des analyses du sol et l'échantillonnage.

Mes remerciements chaleureux à mes amis HEMKA KHALED BEN ELOUALID, OMARI ATTIA, ZRIKI AISSA, BRAGUE NACEUR, BENYAHIA BAGHDAD et HEMKA IBN KHALDOUN, pour leurs aide et soutien durant ces années.

Mes remerciements infinis à mes amis SEBGAGUI FAIÇAL et NAIMA KHATIR.

Mes remerciements, ma gratitude et mes tendres affections à mes parents, mes frères et sœurs.

Enfin, merci à toutes les personnes qui ont de près ou de loin contribué à l'achèvement de ma thèse.

Publications & Communications Scientifiques

Publications avec comité de lecture

- **Tahri, D.**, ElHouiti, F., Ouinten, M. et Yousfi, M. 2019. Distribution modeling, soil properties, and variation in essential oils chemical composition of *Rhanterium adpressum* Coss. & Dur. *European Journal of Ecology*. 5(2), 111-117. <https://doi.org/10.2478/eje-2019-0017>
- **Tahri, D.**, ElHouiti, F., Ouinten, M. et Yousfi, M. 2020. Historical perspective of Algerian pharmacological knowledge. *Advances in Traditional Medicine*. 20, 279-290. <https://doi.org/10.1007/s13596-019-00415-8>
- **Tahri, D.**, ElHouiti, F., Ouinten, M. et Yousfi, M. 2020. Distinction of the distribution areas of genus *Rhanterium* and comparison of the habitat preferences of species by maximum entropy modeling. *Phytologia Balcanica*. 26(1), 65-70.
- **Tahri, D.**, ElHouiti, F., Ouinten, M. et Yousfi, M. 2020. Algerian *Inuleae* tribe species distribution modeling under influence of current and future climate conditions. *Biodiversity Research and Conservation*. 57(1), 23-31. <https://doi.org/10.2478/biorc-2020-00022>
- **Tahri, D.**, Seba, M., ElHouiti, F., Ouinten, M. et Yousfi, M. 2021. Traditional Herbal Uses from Algerian Pharmacopoeia against Infectious Diseases. In : Murad, F., Rahman, A., & Bian, K. Herbal Medicine : Back to the Future, Infectious Diseases, Vol 5, 153-170. <https://doi.org/10.2174/9781681089225121050007>
- **Tahri, D.**, ElHouiti, F., Ouinten, M. et Yousfi, M. 2022. Terpenoids of plants in arid environments. *CABI Reviews*. 17, 001. doi : [10.1079/cabireviews202217001](https://doi.org/10.1079/cabireviews202217001)

Communications dans des congrès

- **Tahri, D.**, ElHouiti, F., Ouinten, M. et Yousfi, M. 2021. Maximum entropy modeling of *Inuleae* tribe species under climate changes scenarios. International Seminar on Biodiversity, Valorization and Conservation of Urban and Forest Ecosystems : (In support of sustainable development), 28-29 April 2021. Mohamed Boudiaf university, M'sila.
- **Tahri, D.**, ElHouiti, F., Ouinten, M. et Yousfi, M. 2021. Characterization of *Rhanterium adpressum* and *Rhanterium suaveolens* distribution areas by MaxEnt

- modeling. International Seminar on Biodiversity, Valorization and Conservation of Urban and Forest Ecosystems : (In support of sustainable development), 28-29 April 2021. Mohamed Boudiaf university, M'sila.
- **Tahri, D.**, ElHouiti, F., Ouinten, M. et Yousfi, M. 2021. Étude *in silico* de l'effet inhibiteur des sesquiterpenes de *Rhanterium adpressum* contre 15-*O*-trichothécène acétyltransférase et 3-*O*- trichothécène acétyltransférase. Séminaire National sur la Biodiversité Végétale et Animale, Environnement et Santé, 20 Mai 2021. Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf, Mila.
 - **Tahri, D.**, ElHouiti, F., Ouinten, M. et Yousfi, M. 2020. L'effet de l' α -Pinène, β -Myrcène, Géraniol et Linalool sur le taux de croissance spécifique de *Fusarium culmorum*. Third International Symposium on Medicinal Plants and Materials, 25-27 February 2020. Larbi TEBESSI university, Tebessa.
 - **Tahri, D.**, ElHouiti, F., Ouinten, M. et Yousfi, M. 2020. Pouvoir antioxydant, effet inhibiteur des huiles essentielles de *Thymus vulgaris* et *Thymus algeriensis* sur la croissance de cinq souches de *Fusarium*. Third International Symposium on Medicinal Plants and Materials, 25-27 February 2020. Larbi TEBESSI university, Tebessa.
 - ElHouiti, F., **Tahri, D.**, Ouinten, M. et Yousfi, M. 2021. Inhibition de la croissance et la production des trichothécènes B des souches de *Fusarium culmorum* par l'huile essentielle de fleurs de *Rhanterium adpressum*. 1er Séminaire National de Phytochimie, Pharmacognosie et Phytothérapie, 09 Décembre 2021. Université Hadj Lakhdar, Batna-1.
 - ElHouiti, F., **Tahri, D.**, Ouinten, M. et Yousfi, M. 2021. L'effet des huiles essentielles des fleurs et des feuilles de *Rhanterium adpressum* sur la croissance et la production des trichothécènes B de *Fusarium graminearum*. Séminaire National sur la Biodiversité Végétale et Animale, Environnement et Santé, 20 Mai 2021. Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf, Mila.
 - ElHouiti, F., **Tahri, D.**, Ouinten, M. et Yousfi, M. 2020. *Fusarium* strains growth inhibition by natural and synthetic bioactive compounds. First international symposium on environment and sustainable development, 10-11 February 2020. Relizane university center Ahmed ZABANA.

Table des matières

Introduction	1
Synthèse bibliographique	4
1 Terpénoïdes des plantes des zones arides	4
1.1 Environnements arides et formes d'adaptation biologique chez les plantes désertiques	6
1.1.1 Caractéristiques des environnements arides	6
1.2 Adaptations des plantes aux milieux arides	8
1.3 Terpénoïdes des plantes des zones arides	10
1.4 Mécanismes protecteurs des terpénoïdes dans les stress abiotiques et biotiques	11
1.4.1 Production de terpénoïdes dans le stress abiotique	11
1.4.2 Production de terpénoïdes dans le stress biotique	13
2 Monographie de <i>R. adpressum</i>	18
2.1 Aspect botanique	18
2.1.1 Synonymes	19
2.1.2 Classification	19
2.1.3 Description	19
2.2 Aspect écologique	21
2.2.1 Interactions plante-insecte	21
2.2.2 Interactions plante-herbivore	22
2.2.3 Interactions plante-plante	23
2.3 Aspect biochimique	24
2.3.1 Composition chimique des parties aériennes de <i>R. adpressum</i>	24

2.3.2	Activités biologiques des métabolites secondaires de <i>R. adpressum</i>	26
Matériels et méthodes		28
3 Matériels et méthodes		28
3.1	Modélisation de la distribution de la tribu des Inulées	28
3.1.1	Collection des données et traitement	28
3.2	Distinction de la distribution de <i>R. adpressum</i>	29
3.2.1	Zone d'étude et occurrence des espèces	30
3.2.2	Prédicteurs bioclimatiques et modélisation	30
3.3	Première collecte de <i>R. adpressum</i>	31
3.3.1	Collecte et extraction des huiles essentielles	31
3.3.2	Analyses chromatographiques CG-DIF	32
3.3.3	Analyse chimiométrique	33
3.3.4	Analyse du sol	33
3.4	Deuxième collecte de <i>R. adpressum</i>	34
3.4.1	Collecte et extraction des huiles essentielles	34
3.4.2	Analyse chromatographique CG-DIF	35
3.4.3	Analyse statistique	36
Résultats et discussion		37
4 Résultats et discussion		37
4.1	Modélisation de la distribution de la tribu des Inulées	37
4.1.1	Distribution dans les conditions climatiques actuelles	37
4.1.2	Distribution sous l'influence des changements climatiques	41
4.2	Distinction de la distribution de <i>R. adpressum</i>	44
4.3	Propriétés physico-chimiques du sol	50
4.4	Composition chimique des huiles essentielles de <i>R. adpressum</i>	51
4.4.1	Analyse chimiométrique	54
4.4.2	Relation entre la composition chimique des huiles essentielles et les propriétés du sol	56
4.5	Variation chimique intra-spécifique des huiles essentielles de <i>R. adpressum</i>	58

4.5.1	Extraction de l'huile essentielle et analyse de la composition chimique	58
4.5.2	Analyse de la variation chimique intra-spécifique des huiles essentielle de <i>R. adpressum</i>	62
Conclusion		70
Bibliographie		73
Annexes		89
A	Huiles essentielles des plantes des zones arides	89
B	Espèces de la tribu des Inulées étudiées	92
C	Analyse du sol	95
D	Relation entre la composition chimique des huiles essentielles et les pro- priétés du sol	96
E	Données de la deuxième collecte	97
F	Sous groupes de β -Pinène/ β -Myrcène	98
G	Sous groupes de β -Myrcène/ <i>p</i> -Cymène	99
Publications		101

Table des figures

1.1	Pourcentage de terres arides par écorégion terrestre	7
1.2	Un mécanisme biochimique pour plusieurs stress abiotiques.	14
2.1	Illustrations de <i>R. adpressum</i>	20
2.2	La variation saisonnière de la composition chimique en pourcentage de la matière sèche	24
2.3	La variation des teneurs en phénols totaux dans les deux extraits méthano- lique et acétonique de fleurs de <i>R. adpressum</i> collectées en trois mois, pendant deux ans (2011 et 2012)	25
2.4	La variation des pourcentages des familles des monoterpènes et sesquiter- pènes des huiles essentielles de feuilles et de fleurs de <i>R. adpressum</i> collectés en trois mois pendant trois ans (2011-2013)	26
3.1	Présentation des sites de collecte de <i>R. adpressum</i>	32
3.2	Sites de collecte de <i>R. adpressum</i> pour l'étude	35
4.1	Modèle de la distribution potentielle des espèces de la tribu des Inulées en Algérie.	38
4.2	Les niches bidimensionnelles des différentes espèces de la tribu des Inulées.	40
4.3	Prédictions des futurs habitats favorables pour les espèces de la tribu des Inulées selon les scénarios climatiques RCP.	42
4.4	Modèles de distribution des espèces <i>R. adpressum</i> et <i>R. intermedium/suaveolens</i> en Algérie.	46
4.5	Les variables bioclimatiques, contribution et variation dans les modèles obtenus	47
4.6	Pourcentages des composants chimiques et physiques des échantillons du sol analysés.	51

4.7	La variation de la composition chimique de l'huile essentielle de <i>R. adpressum</i>	53
4.8	Les profils chromatographiques de CG-DIF de 15 échantillons des HE de <i>R. adpressum</i> , alignés par 0,10 min avec le package ChemoSpec de R.	54
4.9	Représentation des scores de l'ACP des profils chromatographiques des échantillons des trois sites	55
4.10	Analyse statistique des données spectrophotométriques UV-Vis des 15 échantillons de l'HE de <i>R. adpressum</i>	55
4.11	Diagramme de Pareto des effets des variables de la composition du sol sur la variation des monoterpènes et sésquiterpènes hydrocarbures ou oxygénés.	57
4.12	Les teneurs en huile essentielles de <i>R. adpressum</i> obtenues après une hydro-distillation de 4 h.	59
4.13	Graphe des scores d'ACP de la variation de la composition chimique des huiles essentielles de <i>R. adpressum</i>	63
4.14	Graphe des scores d'ACP avec les variables de la composition chimique de chaque groupe.	63
4.15	Dendrogramme de l'analyse ascendante hiérarchique de la composition chimique des huiles essentielles de <i>R. adpressum</i>	64
4.16	Graphe de la corrélation des facteurs géo-climatiques avec les deux groupes chimiques de l'huile essentielle de <i>R. adpressum</i>	65
4.17	Graphes des séries chronologiques du mois de mars 2021 concernant Tmin, Tmax et humidité relative	66
D.1	Droite de Henry des effets des variables de la composition du sol sur la variation des monoterpènes et sésquiterpènes hydrocarbures ou oxygénés. .	96
F.1	Graphe des scores d'ACP montrant les sous groupes au sein du groupe β -Pinène/ β -Myrcène.	98
G.1	Graphe des scores d'ACP montrant les sous groupes au sein du groupe β -Myrcène/ <i>p</i> -Cymène.	99

Liste des tableaux

4.1	Contributions des variables bioclimatiques dans les modèles de MaxEnt . . .	39
4.2	Les variations des valeurs moyennes des changements prédits de six variables bioclimatiques influençant la distribution de la tribu des Inulées dans les modèles obtenus.	43
4.3	Pourcentages de contribution majeurs dans l'élaboration des deux modèles de prédiction de la convenance des habitats pour <i>R. adpressum</i> et <i>R. intermedium/suaveolens</i>	45
4.4	Les valeurs moyennes des variables bioclimatiques caractérisant la préférence d'habitat pour les espèces <i>R. adpressum</i> et <i>R. intermedium/suaveolens</i> avec leurs déviations standards.	48
4.5	Composition chimique des huiles essentielles du <i>Rhanterium adpressum</i> récolté de trois sites pendant cinq mois.	52
4.6	Composition chimique des huiles essentielles du <i>Rhanterium adpressum</i> récolté de différentes régions de l'Algérie.	60
A.1	Les composés majoritaires dans les huiles essentielles des plantes des zones arides.	89
B.1	Liste des espèces étudiées avec les coordonnées en degré décimal et les régions d'occurrence en Algérie.	92
C.1	Analyse du sol	95
E.1	Données de la deuxième collecte de <i>R. adpressum</i>	97

Liste des abréviations

AAB	Acide ABscissique
ACP	Analyse en Composantes Principales
ADF	Acid Detergent Fiber
ADL	Acid Detergent Lignin
AUC	Area Under the Curve
cab	Chlorophyll a/b-binding protein
CBW	Cellulose Brute de Weende
CCSM	Community Climate System Model
CE	Conductivité Électrique
CG-DIF	Chromatographe en phase Gazeuse avec Détecteur à Ionisation de Flamme
CI50	Concentration Inhibitrice médiane
CMI	Concentration Minimale Inhibitrice
Coss. & Dur.	ERNEST <u>COSSON</u> & MICHEL CHARLES <u>DURIEU</u> DE MAISONNEUVE
CPG	Chromatographie en Phase Gazeuse
CSV	Comma-separated values
Desf.	RENÉ LOUCHE <u>DESFONTAINES</u>
DPPH	2,2-DiPhényl-1-PicrylHydrazyle
DS	DéviatiOn Standard
ETP	Évapotranspiration Potentielle
gC m ⁻² an ⁻¹	Gramme de Carbone par mètre carré par an
GCM	General Circulation Models
HE	Huile Essentielle
IA	Indice d'Aridité
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPV	IsoPrénoïdes Volatiles

IR	Indice de Rétention
LEA	Late Embryogenesis Abundant
MAT	Matières Azotées Totales
MaxEnt	Maximum d'Entropie
mg GAE/g	milligrammes d'Équivalent d'Acide Gallique par gramme
MM	Matière Minérale
MNHN	Muséum National d'Histoire Naturelle de France
MO	Matière Organique
NDF	Neutral Detergent Fiber
PEPcase	PhosphoÉnolPyruvate carboxylase
PSE	Pourcentage du Sodium Échangeable
rbcS	Ribulose Bisphosphate Carboxylase Small chain
RCP	Representative Concentration Pathways
ROC	Receiver Operating Characteristic
TgC an ⁻¹	Teragramme de Carbone par an
Tmax	Température maximale
Tmin	Température minimale
UV-Vis	UltraViolet-Visible

Introduction

Introduction

La tribu des *Inulées* (*Asteraceae*) comporte environ 66 genres et approximativement 690 espèces dont ses plus larges genres sont *Inula* et *Pulicaria*. Des études se sont intéressées aux aspects systématiques et aux relations phylogénétiques à l'intérieur de cette tribu ([Osman, 2006](#) ; [Torices et Anderberg, 2009](#) ; [Nylinder et Anderberg, 2015](#)), alors que la distribution et l'habitat de leurs espèces restent encore non étudiés malgré l'importance et l'influence des facteurs climatiques, environnementaux et biophysiques sur la répartition des espèces et les variations génétiques ou chimiques inter/intra spécifiques.

Au cours des dernières années, la prédiction et le *mapping* des habitats favorables et des distributions potentielles des espèces ont pris une importance grandissante dans les domaines de biogéographie et d'écologie afin d'évaluer l'impact du changement climatique et d'identifier les zones de collecte ou les zones appropriées pour la production forestière ([Kumar et Stohlgren, 2009](#) ; [Elith *et al.*, 2011](#)). Pour ces raisons, les outils de modélisation de la distribution des espèces ont devenu beaucoup plus populaires et utilisables en écologie et ses applications ; les modèles générés vont établir les relations entre l'occurrence des espèces et les conditions environnementales et biophysiques des zones d'études. Ceci va aider à définir la niche à partir des valeurs environnementales correspondent aux points de présence et calculer les similarités entre les valeurs environnementales dans une cellule de raster donnée ainsi que celle de la niche de l'espèce modélisée ([Kumar et Stohlgren, 2009](#) ; [Elith *et al.*, 2006](#)).

Representative Concentration Pathways (RCP) se sont des scénarios développés par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) utilisés pour modéliser le climat future en prenant en considération le volume des gazes à effet de serre émis, les polluants de l'air et le changement dans les utilisations des terres. Plusieurs modèles ont été conçus pour prédire les

conditions climatiques futures et sur la base de ces Modèles de Circulation Générale (GCM) des couches climatiques ont été établies pour aider à modéliser l'impact du changement climatique sur la distribution des espèces ([Van Vuuren et al., 2011](#)).

Le genre *Rhanterium* Desf. (1799) appartient à la tribu des *Inulées*. Ce sont des arbustes très ramifiés, à tiges et feuilles revêtues de poils blanchâtres, avec des feuilles petites, toujours sessiles, un peu dentées, caduques et capitules à involucre sphériques formés de plusieurs rangs de bractées ([Ozenda, 2004](#)). Le genre *Rhanterium* comprend 4 espèces, à savoir : *R. epapposum* Oliv. (1881) endémique à la péninsule arabique, *R. adpressum* Coss. & Dur. (1855), réparti dans le sud du Maroc, la Mauritanie et l'Ouest de l'Algérie, la troisième espèce *R. suaveolens* Desf. (1799) se distribue de l'Est de l'Algérie jusqu'au sud de la Tunisie et la Libye. Dans les zones de rencontre de ces deux dernières espèces, dans le centre de l'Algérie se trouve une espèce hybride nommée *R. intermedium* Pomel (1874), caractérisée par une morphologie intermédiaire entre *R. adpressum* et *R. suaveolens* parfois proche de l'une des deux ([Wiklund, 1986](#)).

Des études antérieures sur le *R. adpressum* d'Algérie ont investigué les propriétés biochimiques des extraits lipidiques ([Hamia et al., 2013](#)), phénoliques ([Chehma et Youcef, 2009](#) ; [Khacheba et al., 2014](#) ; [Boussoussa et al., 2016](#)) et volatils ([Elhouiti et al., 2016, 2017](#)) des parties aériennes. D'autres études ont comparé des caractères botaniques avec les autres espèces du genre *Rhanterium* ou la tribu des *Inulées* ([Reese, 1957](#) ; [Leins, 1971](#) ; [Wiklund, 1986](#)) et mesuré des paramètres d'adaptation anatomique aux conditions arides ([Houari et al., 2012](#)).

Afin de contribuer à la connaissance de l'espèce *R. adpressum*, nous avons entrepris une étude éco-biochimique. Nous avons établi une chorologie locale, dans les conditions climatiques actuelles et futures, ainsi que la variabilité de la composition chimique des huiles essentielles des échantillons testés, afin de caractériser les différents groupes chimiques intra-spécifiques.

Les principaux objectifs du présent travail étaient :

- Étudier, en Algérie, la distribution géographique de *R. adpressum*, comparée à celle des espèces *R. suaveolens* et *R. intermedium*, sous l'influence des conditions

bioclimatiques actuelles et futures.

- Évaluer la variabilité de la composition chimique des huiles essentielles de *R. adpressum* provenant de différentes localités algériennes afin de déterminer les groupes intra-spécifiques en relation avec les caractéristiques écologiques des habitats.

Le premier chapitre de cette thèse est consacré à une synthèse bibliographique sur les terpénoïdes des plantes des zones arides, les définitions des environnements arides, leurs caractéristiques, les propriétés des xérophytes, les facteurs influençant la composition de leurs huiles essentielles et les rôles des terpénoïdes.

Dans le deuxième chapitre, une monographie de *R. adpressum* basée sur les travaux antérieurs concernant les aspects botanique, écologique et biochimique.

Le troisième chapitre comporte la démarche expérimentale, le matériel et les méthodes utilisées dans l'étude de la chorologie locale ou dans l'investigation de la géographie des chémotypes de *R. adpressum*.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats, l'interprétation et la discussion.

Une conclusion générale à la fin de cette thèse reprend les objectifs atteints et les perspectives de recherche.

Synthèse bibliographique

Terpénoïdes des plantes des zones arides

La vie des plantes dans les zones arides est fortement influencée par les conditions écologiques sévères et hostiles. En s'adaptant à ces conditions, les plantes ont dû développer les mécanismes physiologiques et chimiques pour survivre et établir des réseaux de communication liés aux interactions biotiques ou abiotiques quotidiennes. Les zones arides occupent 5,36 millions de km² ou 41% de la surface terrestre et leurs principales caractéristiques sont une plage extrême de température et de rayonnement solaire, des précipitations irrégulières et faibles, une vitesse de vent élevée en été, un sol sablonneux et une végétation xérophytique et halophytique clairsemée ([Gaur et Squires, 2018](#)).

Contrairement aux plantes annuelles éphémères qui raccourcissent leur cycle de vie en profitant d'un climat doux et favorable, les plantes vivaces avec un cycle de vie plus long sont tolérantes par des formes d'adaptation physiologique, entretenues par des voies de régulation génétiques et métaboliques en fonction des propriétés du microclimat. Par conséquent, les plantes vivaces améliorent les conditions microclimatiques difficiles et la fertilité du sol, ce qui fait de leurs sites des endroits sûrs pour les plantes annuelles mais dans les limites de la disponibilité de l'eau et des conditions climatiques tolérables, la relation entre les plantes vivaces et annuelles peut devenir négative ([Luzuriaga *et al.*, 2012](#)).

La réponse de la plante aux stress environnementaux débute par la transmission ou la transduction de signaux de stress, perçus au niveau membranaire, suivi de la production de seconds messagers et de facteurs de transcription contrôlant l'expression de gènes impliqués dans la réponse au stress, par des changements biochimiques ou physiologiques

à court ou long terme. L'adaptation des plantes à la sécheresse provoque des modifications de l'équilibre hormonal avec augmentation de la synthèse d'acide abscissique, d'éthylène et de jasmonate et diminution de la cytokinine, ce qui génère également une augmentation de la machinerie enzymatique des produits métaboliques secondaires (terpénoïdes, stéroïdes, alcaloïdes, flavonoïdes, etc.), des enzymes hydrolytiques, des protéinases et des enzymes catalysant la synthèse des osmolystes ([Calatayud *et al.*, 2013](#) ; [Abobatta, 2019](#)).

Deux voies de synthèse distinctes, dans les plastes et le cytoplasme, conduisent à la production de terpénoïdes à partir de deux unités C5 inter-convertibles : l'isopentényl diphosphate (IPP) et son isomère allélique diméthylallyl diphosphate (DMAPP). La voie de l'acide mévalonique (MVA) dans le cytosol produit des sesquiterpènes. La voie du méthylérythritol phosphate (MEP) dans les plastes est principalement responsable de la biosynthèse des mono- et diterpènes. Les terpénoïdes sont des molécules à base d'unités isopréniques C5 formées par addition "tête-queue" ou "tête- tête " donnant des hémiterpènes (C5), des monoterpènes (C10), des sesquiterpènes (C15), des diterpènes (C20) y compris la chaîne latérale de chlorophylle, phylloquinones, tocophérol, gibbérellines et hytoalexines, et des triterpènes (C30) tels que les phytostérols, les brassinostéroïdes et les tétraterpènes (C40) qui comprennent principalement des caroténoïdes ([Rodriguez-Concepción et Boronat, 2002](#) ; [Zahedi *et al.*, 2021](#)).

Les monoterpènes et les sesquiterpènes constituent une large classe de composés volatils, impliqués dans plusieurs fonctions physiologiques et écologiques en fonction des différents profils d'expression des gènes des terpènes synthases. Ils jouent un rôle important dans les réponses aux stress abiotiques, tels que le stress hydrique, le stress salin, la température élevée et le stress oxydatif, comme ils peuvent jouer des rôles bénéfiques ou antagonistes dans les interactions biotiques ; dans l'attraction des pollinisateurs, la dissuasion des ravageurs, la défense directe ou indirecte contre les insectes herbivores, l'allélopathie et d'autres interactions plantes-microorganismes ([Abbas *et al.*, 2017](#) ; [Mann, 1987](#)). Le but de ce chapitre est d'étudier les caractéristiques des milieux arides et des plantes désertiques, les formes d'adaptation biologique et l'importance des terpénoïdes dans les interactions écologiques biotiques et abiotiques.

1.1 Environnements arides et formes d'adaptation biologique chez les plantes désertiques

1.1.1 Caractéristiques des environnements arides

Les environnements arides peuvent être définis par les faibles et irrégulières précipitations annuelles (<250 mm) (Noy-Meir, 1973 ; Jafari *et al.*, 2018). Trois zones y ont été distinguées : extrême aride (E) moins de 60 à 100 mm, aride (A) entre 100 et 150 mm et semi-aride (S) entre 150 et 250 mm. Ces environnements peuvent être aussi définis par la moyenne annuelle du rapport précipitations/évapotranspiration potentielle p/ETP (l'indice d'aridité : IA) variant entre 0,03-0,5 (Dietz et Veldhuizen, 2004) selon lequel on peut les classer en trois zones : hyper arides (IA : 0,03), arides (IA : 0,03-0,2) et semi-arides (IA : 0,2-0,5). Une autre définition a été faite en combinant l'indice d'aridité et l'indice de végétation (Gamo *et al.*, 2013). Dans ce cas quatre catégories peuvent être distinguées : déserts sévères (A), régions semi-arides (G), zones irriguées et oasis (I) et zones de dégradation du sol (S).

Les zones arides occupent des surfaces importantes dans les hémisphères nord (entre 10° et 50° N) et sud (entre 15° et 50° S) de la planète (figure 1.1) dont la plus grande est en Afrique (59%) suivie de l'Asie (33%) et l'Australie est dominée à 82% par ces zones qui, au contraire, ne représentent pas plus de 20% dans les Amériques (nord et sud) (Dregne, 1976). Pendant que le public perçoit ces zones en expansion constante, ces systèmes, en réalité, sont très dynamiques, sous l'influence des facteurs climatiques et anthropiques comme les précipitations et le surpâturage, du fait que la lisière du Sahara entre 1980 et 1995 s'est déplacée dans des directions différentes jusqu'à 300 km en fonction des précipitations (McNeely, 2003).

L'ensemble de ces zones appartient au groupe : Pedocal caractérisé par l'existence de carbonate de calcium et dominé par des sols minéraux (Entisols) avec des concentrations très faibles en matière organique et une carence en eau (Aridisols). La nature de ces sols est influencée par les facteurs de pédogénèse et principalement par des processus d'altération physique d'érosion et résédimentation (Dregne, 1976 ; Jafari *et al.*, 2018).

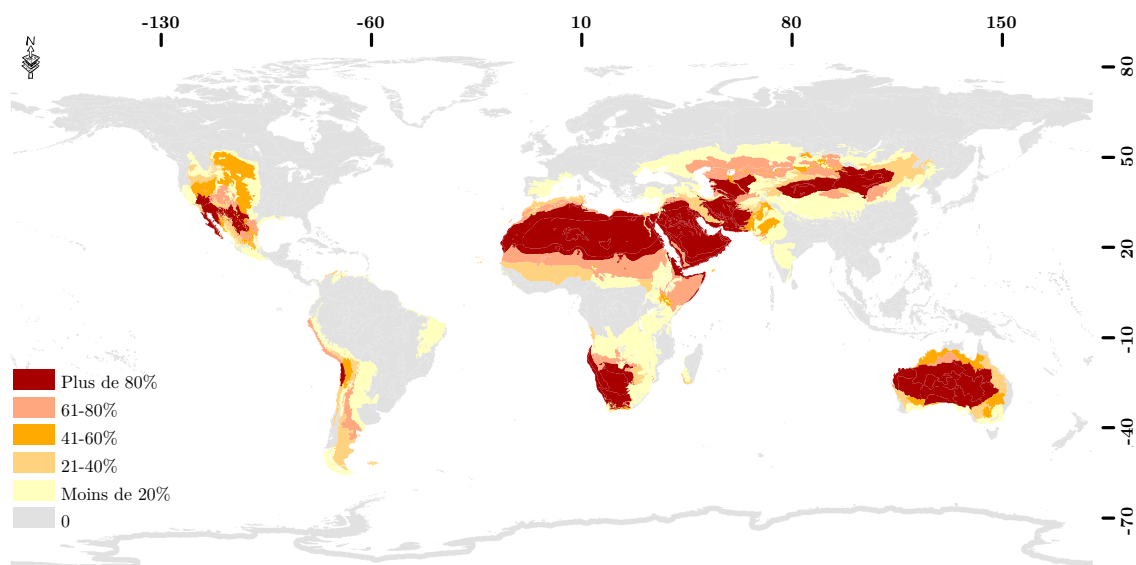


FIGURE 1.1 – Pourcentage de terres arides par écorégion terrestre, une carte publiée par Hoekstra *et al.* (2010)¹.

La plupart des terres arides ont une croute supérieure. De ce fait, une petite quantité de précipitations, qui sont d'ailleurs limitées, pénètre dans le sol avant de s'évaporer. La partie inférieure est appelée horizon mort puisqu'elle est presque sèche. Le faible rapport de carbone à l'azote est caractéristique dans ces zones à cause de manque de formation d'acide humique. Les terres arides, en revanche, sont riches en argile et souvent alcalines à cause de CaCO_3 ($\text{pH} < 8.4$) ou fortement alcalines à cause de NaCO_3 ($\text{pH} > 8.5$) (Jafari *et al.*, 2018).

Dans les zones arides et désertiques les précipitations varient considérablement entre les mois, les saisons et les années avec un maximum, généralement de 70-80 mm alors que 50% des faibles précipitations continues dans ces zones ont une intensité de plus de 20 mm/h et environ 20-30% ont une intensité de plus de 40 mm/h. La partie de ces précipitations qui va s'évaporer plus la transpiration des plantes vont augmenter la sécheresse de ces environnements où, comme le cas de Téhéran en Iran, le taux de l'évapotranspiration est plus élevé que les précipitations annuelles d'environ 5 fois plus (1250 mm) et ce taux peut atteindre 100 fois plus dans des régions de l'Asie et de l'Afrique.

1. La carte a été téléchargée sous licence *Creative Commons Attribution-NonCommercial* du site : <https://databasin.org/> (Consulté avec succès : 09 octobre 2021).

L'évapotranspiration augmente avec les vents fréquents et intenses qui transmettent une grande quantité de sable sur de grandes distances entraînant l'érosion de la surface du sol. La température dans les zones arides varie entre 30 et 40°C et s'élève plus dans les régions dépourvues de végétations. La fluctuation annuelle reste moins importante comparée aux autres zones mais la différence est significative entre le jour et la nuit ([Dregne, 1976](#) ; [Gaur et Squires, 2018](#) ; [Jafari et al., 2018](#)).

1.2 Adaptations des plantes aux milieux arides

Dans les zones arides, 3/4 des plantes appartient aux familles des graminées, légumineuses et composées pouvant représenter 1/3 de la flore dans ces zones. D'autres familles comme les *Brassicaceae*, *Convolvulaceae*, *Asclepiadaceae*, *Capparaceae*, *Chenopodiaceae* et *Zygophyllaceae* peuvent être représentées dans ces régions par un ou deux genres et ces derniers peuvent contenir, parfois, une ou deux espèces comme le cas de *Haloxylon*, *Traganum* et *Peganum* ([Ozenda, 2004](#) ; [Brown, 1974](#)).

Le couvert végétal dans les régions arides et sahariennes est discontinu et très irrégulier par le fait des conditions difficiles qui influent la distribution des plantes dans leur recherche de l'eau et la protection. Par conséquent, les plantes ont développé des mécanismes d'adaptation à l'environnement aride et dans la nécessité de survivre à ces conditions. La germination des graines de certaines plantes est rapide en profitant des faibles précipitations comme les graines d'*Anabasis aretioides* qui peuvent commencer à germer après 10 minutes et 45 minutes plus tard, les racines se développent et les cotylédons seront capables de la photosynthèse ([Brown, 1974](#)).

Si la germination rapide ne se présente pas pour tout les cas, les graines de ces plantes ont une assez forte longévité qui leurs donne une capacité de germer dans des temps différents pouvant aller à plusieurs années. Il faut aussi signaler que les conditions édaphiques et climatiques dures affectent le développement des nouvelles plantules à cause de leur faible résistance et si elles arrivent à subsister et traverser cette période, des mécanismes d'adaptation seront développés au cours de la croissance ([Ozenda, 2004](#)).

Des mécanismes ont été développés par ces plantes pour s'adapter à la sécheresse avec une utilisation maximale du minimum d'eau dans un cycle de vie court (mécanisme d'échap-

pement), ou par suppression des parties aériennes durant ces périodes et conservation des parties souterraines comme les rhizomes et les bulbes (géophytes : *Drimia noctiflora* (Batt. & Trab.) Stearn et *Androcymbium gramineum* (Cav.) J.F.Macbr.) et dans d'autre cas, des plantes éliminent seulement les feuilles pour réduire la transpiration (Brown, 1974).

La végétation dans les zones arides peut être temporelle (éphémère) nommée par les populations : Acheb, ce sont des plantes annuelles ou géophytes qui apparaissent suite aux pluies et peuvent fleurir en présence de deux feuilles seulement et leurs graines atteignent la maturité dans des semaines voire des jours. Il y a d'autres plantes (pérennes) qui ne réduisent pas leurs cycles végétatifs et préfèrent d'autres formes d'adaptation physiologique comme la croissance remarquable du système racinaire et la réduction de la surface foliaire et les feuilles peuvent être parfois velues ou charnues avec une réduction du nombre des stomates (Ozenda, 2004 ; Brown, 1974).

Aux niveaux cellulaire et moléculaire, les conséquences de la sécheresse se manifestent par une modification de balance hormonale de l'auxine, les gibberellines et les cytokinines et aussi les autres médiateurs de la réponse au stress comme l'Acide ABA (AAB), l'éthylène et le jasmonate. Dans le cas général de sécheresse, la synthèse de l'AAB augmente et celle des cytokinines et la plupart des protéines diminue avec une induction parallèle de la synthèse des protéines de stress. En plus, l'activité de certaines enzymes comme la Rubisco et la PEPcase diminue et celle d'autres enzymes comme l' α -amylase et les protéinases augmente. La teneur en AAB augmente aussi au voisinage des cellules de garde faisant par conséquent diminuer la conductance stomatique (Calatayud *et al.*, 2013).

Sous l'influence du stress abiotique, l'AAB régule l'expression des gènes LEA (*late embryogenesis abundant*) faisant apparaître une famille des protéines LEA très riche en glycine hydrophile qui jouent un rôle important dans la protection des cellules et sont largement distribués dans les mitochondries, les chloroplastes et le cytoplasme. L'expression d'autres gènes augmente pour ajuster l'osmose des cellules en accumulant des osmolytes comme la proline, la glycine et le saccharose. En revanche, l'expression des gènes *rbcS* de la Rubisco et *cab* des protéines associées aux chlorophylles a et b diminue (Chen *et al.*, 2019 ; Calatayud *et al.*, 2013).

1.3 Terpénoïdes des plantes des zones arides

Les simulations estiment l'émission globale annuelle actuelle (1971-2000) d'isoprène et de monoterpènes entre 400 TgC an⁻¹ et 30 TgC an⁻¹ respectivement. Ces émissions dans les zones arides ne dépassent pas 2 gC m⁻² an⁻¹ pour les isoprènes et 0,1 gC m⁻² an⁻¹, pour les monoterpènes (Hantson *et al.*, 2017). Les monoterpènes hydrocarbures et oxygénés caractérisent généralement la composition chimique des huiles essentielles des plantes des zones arides en jouant un rôle important dans leurs interactions écologiques et dans leurs réponses aux stress biotiques et abiotiques (Annexe A.1) (Mann, 1987).

En revanche, la composition des huiles essentielles de certaines espèces est dominée par des sesquiterpènes comme *Warionia saharae* Benth. & Coss. (β -Eudesmol 52,7%), *Trichodesma africanum* (L.) R.Br. (Caryophyllène oxide 15,6%, γ -Eudesmol 13,7% et α -Muuroène 10,5%), *Cyperus conglomeratus* Rottb. (Cyperène 27,2%), *Calligonum azel* Maire (Viridiflorol 14,6% et α -Eudesmol 8,65%) et *Anvillea radiata* Coss. & Dur. (Oxocyclonerolidol 66,6%). Parfois, des composés monoterpéniques et sesquiterpéniques dominent cette composition comme dans le cas de *Bubonium graveolens* (Forssk.) Maire (1,8-Cinéol 21,5% et δ -Cadinol 19,1%), *Cymbopogon schoenanthus* (L.) Spreng. (Pipéritone 14,6%, β -Elemène 11,6%, α -Eudesmol 11,5%, Elemol 10,8% et β -Eudesmol 8,5%) et *Zilla macroptera* Coss. (Géranyl butyrate 13,52% et Caryophyllène oxide 6,76%).

Les plantes des environnements arides sont également une source de terpènes complexes, comme les diterpènes et les triterpènes. Par exemple, plusieurs diterpènes, dont la majorité sont des dérivés du labdane ou du grindelane, ont été identifiés à partir des matières sèches des espèces de *Chrysothamnus*. Par conséquent, l'acide viscidique A et l'acide viscidique B ont été isolés de *C. viscidiflorus* (Hook.) Nutt. et pour la première fois, l'acide chrysoïque et le chrysothane ont été isolés de *C. paniculatus* (A. Gray) H. M. Hall. De plus, deux nouveaux diterpénoïdes de l'acide grindélique, les acides 18-hydroxygrindélique et 18-succinyloxygrindélique, ont été isolés de *C. nauseosus* Britton & A. Br. (Timmermann *et al.*, 1983 ; Hegazy *et al.*, 2007).

Des triterpènes tétracycliques, les argentatines A, B, C et D et l'isoargentatine B, étaient abondants dans l'extrait de résine de *Parthenium argentatum* x *P. tomentosum*

(Maatooq, 2003). Cependant, deux nouveaux triterpènes de dammarane, le (3R,20S)-3,20-dihydroxydammar-24-ène et le (3R,20S)-3-acétoxy-20-hydroxydammar-24-ène, ont été isolés de la résine de *Commiphora confuse* Vollesen (Dekebo *et al.*, 2002). Le matériel végétal broyé de *Cowainea inexcicata* s'est avéré riche en triterpènes pentacycliques tels que les acides ursolique, pomolique, 2 β -hydroxyursolique et 2-épitormentique (Hoffmann *et al.*, 1994). De plus, deux saponines triterpénoïdes complexes, les avicines D et G, ont été isolées des gousses d'*Acacia victoriae* Benth. (Parente *et da Silva*, 2009).

1.4 Mécanismes protecteurs des terpénoïdes dans les stress abiotiques et biotiques

1.4.1 Production de terpénoïdes dans le stress abiotique

Une corrélation positive a été observée entre l'émission des isoprènes et la photosynthèse. Même après la saturation du processus photosynthétique cette émission continue d'augmenter avec l'augmentation de l'intensité de la lumière et de la température (Velikova, 2008). La production de ces molécules est un mécanisme, entre autres, de la thermo-tolérance des plantes, fournissant une protection des processus photosynthétique et respiratoire par l'amélioration de la stabilité membranaire (Sharkey *et al.*, 2008).

L'émission des monoterpènes par *Quercus ilex* L. exposé à un intervalle de température entre 30 et 55 °C montre un maximal de production de l' α -Pinène, β -Pinène, Sabinène, Myrcène et Limonène atteint à 35 °C et qui diminue avec l'augmentation de la température, mais à 55 °C l'émission de Myrcène et Limonène a été plus élevée qu'à 30 °C. D'autre part, la production de cis- β -Ocimène et trans- β -Ocimène ne semble pas significativement affectée par l'augmentation de la température (Loreto *et al.*, 1998).

La température élevée et l'excès de lumière peut provoquer un stress oxydant du à l'accumulation des dérivés réactifs de l'oxygène comme l'oxygène singulet ($^1\text{O}_2$), l'anion superoxyde ($\text{O}_2^{\bullet-}$), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et le radical hydroxyle ($\bullet\text{OH}$). La pulvérisation des plantes de *Cinnamomum camphora* (L.) J.Presl avec 20 ml de 1, 10 ou 50 mM d' H_2O_2 a augmenté l'émission des monoterpènes et encore plus les monoterpènes oxygénés par rapport aux plantes soumises à une température de 25 à 45 °C. Alors qu'en

présence d'un inhibiteur de synthèse des monoterpènes (une pulvérisation de 20 ml avec 30 μ M de Fosmidomycine), le contenu en $O_2^{\bullet-}$ et H_2O_2 a subi une augmentation de 15% à 45 °C et le taux de photosynthèse a diminué de 25% et 63% à 35 °C et 45 °C, respectivement (Zuo *et al.*, 2017). Il a été aussi montré que le processus photosynthétique des plantes produisant les monoterpènes serait beaucoup plus sensible en présence d'ozone (O_3) si l'émission est inhibée par la Fosmidomycine (Vickers *et al.*, 2009).

L'étude de l'effet du stress hydrique sur *Cistus albidus* L. et *Pinus halepensis* Mill. pendant 11 jours, a montré un effet significativement positive sur la production des monoterpènes, pendant les premiers 7 jours puis une légère diminution lorsque ce déficit est sévère. En revanche, l'émission des monoterpènes par *Rosmarinus officinalis* L. et *Quercus coccifera* L. n'a pas changé pendant cette période par rapport au témoin. Les feuilles de *C. albidus* et *P. halepensis* contiennent des compartiments de stockage des monoterpènes et leur émission a été en relation avec la photosynthèse qui sera affectée par la longue période de sécheresse du fait que dans ces périodes environ 50% du carbone fixé par la photosynthèse est émis en isoprènes. *R. officinalis* a aussi ces compartiments mais il a été suggéré que sa production de monoterpènes n'est pas complètement dépendante de la photosynthèse, par contre *Q. coccifera* est dépourvu de ces structures mais sa capacité à conserver l'eau pendant de longues périodes a maintenu la production des monoterpènes malgré ce stress hydrique (Ormeño *et al.*, 2007a).

Le stress salin affecte aussi la production des monoterpènes, pour *R. officinalis*. Les pourcentages de 1.8-Cinéole et de Camphre ont été élevés après l'ajout de 100 mM d'NaCl contrairement à l' α -Terpinéol et Bornéol qui ont subi une légère diminution. cet effet peut changer sous l'influence de l'âge des plantes, la durée du traitement et le degré de tolérance à la salinité (Tounekti *et al.*, 2011). Ainsi, les pourcentages de 1.8-Cinéole, du Camphre et du Bornéol ont augmenté chez les plantes de *R. officinalis* irriguées par une solution à 4,2 g d'NaCl/l par rapport aux plantes irriguées par l'eau de robinet mais ces pourcentages sont moins faibles que ceux obtenus chez les plantes sous stress hydrique (Sarmoum *et al.*, 2019).

Selon le type de sol et les pourcentages de ses nutriments, l'émission des monoterpènes par *R. officinalis* et *P. halepensis* a été élevée dans des sols calcaires et corrélée positivement avec leurs teneurs en N, P, K et Ca^{2+} . Contrairement à ces deux espèces, les monoterpènes

de *C. albidicus* étaient plus élevés dans des sols siliceux et négativement corrélés avec N et P ce qui peut être interprété par l'implication d'autres facteurs dans cette émission et le fait que la dépendance à ces nutriments peut être changée durant le cycle phénologique (Ormeño *et al.*, 2007b).

Les mécanismes par lesquels les monoterpènes exercent leur effet protecteur sont encore indéterminés, mais le point commun entre tout les stressés abiotiques est le fait qu'ils entraînent la génération des espèces oxydantes dangereuses pouvant réagir avec toutes les biomolécules (par l'oxydation des protéines, les acides gras polyinsaturés et l'ADN). Vickers *et al.* (2009) ont proposé un modèle du rôle protecteur des composés volatils expliqué par un seul mécanisme biochimique contre plusieurs stressés physiologiques (figure 1.2).

1.4.2 Production de terpénoïdes dans le stress biotique

Les rôles des terpénoïdes dans les interactions biotiques des plantes diffèrent entre la défense, l'attraction ou la dissuasion en relation avec des insectes ennemis, des pollinisateurs, des animaux herbivores, des plantes en compétition ou en association. Plus de 30 000 terpénoïdes résultant de l'activité des terpènes synthases sont capables de produire jusqu'à 50 composés différents à partir du même substrat et avec les autres métabolites secondaires, les plantes trouvent des mécanismes pour survivre à ce dilemme (Degenhardt, 2008).

Deux mécanismes de défense direct et indirect sont utilisés par les plantes contre les insectes herbivores. Ces insectes (Aphidiens, Coléoptères, Lépidoptères..) sont attirés, aux plantes hôtes, par les composés volatils pour se nourrir ou pondre les œufs. L'adaptation de ces insectes aux terpénoïdes leur a permis de réutiliser ces métabolites comme des précurseurs de phéromones d'attraction entre les mâles et les femelles. L' α -Pinène, le Limonène et la Caryophyllène émis par le cotonnier attirent les males d'*Anthonomus grandis* (Boheman, 1843) qui se nourrissent et réutilisent ces terpénoïdes pour élaborer des phéromones (Grandlures I, II, III et IV) attractives de leurs semblables (Mann, 1987).

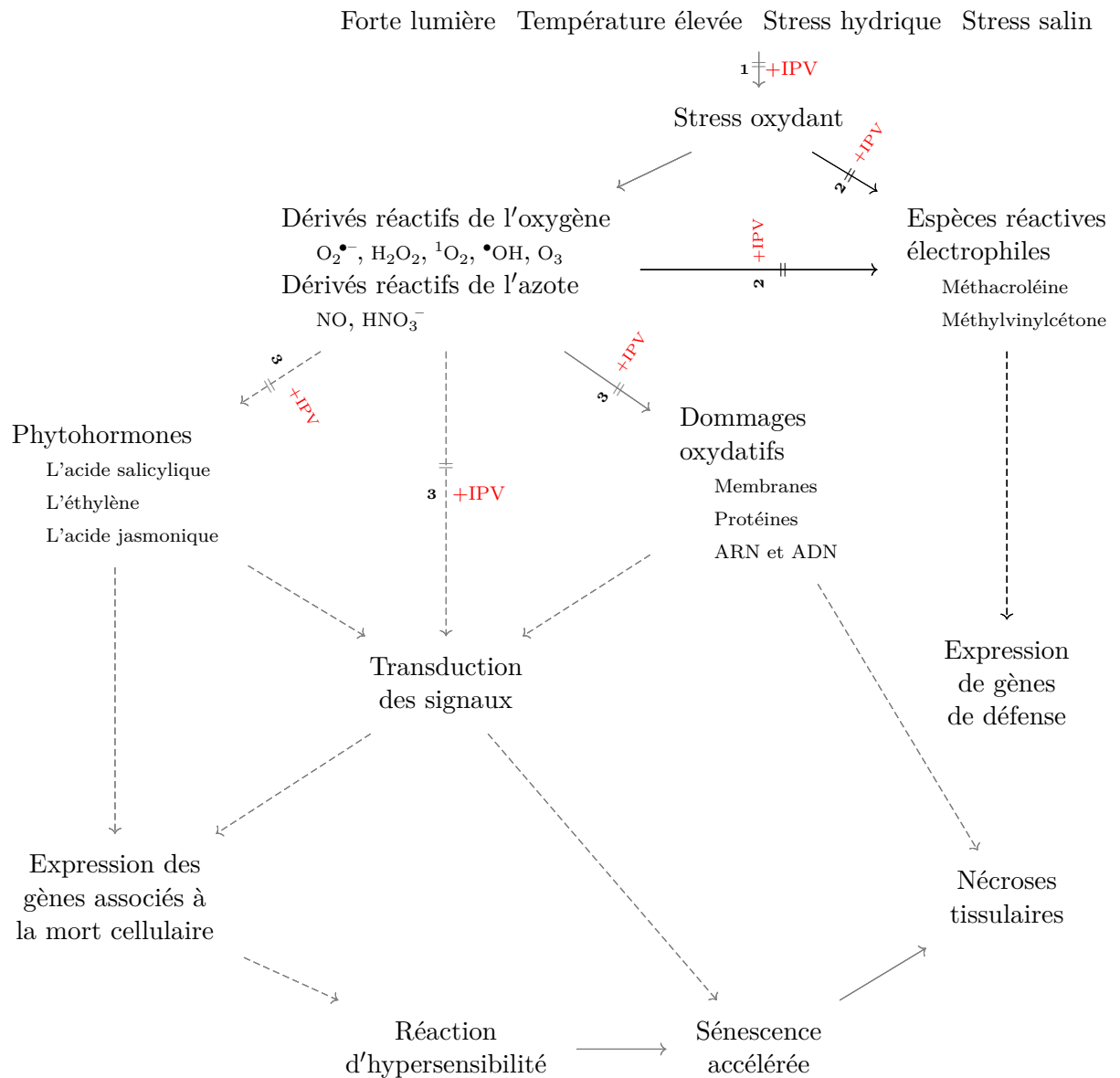


FIGURE 1.2 – Un mécanisme biochimique pour plusieurs stress abiotiques, montrant l’effet protecteur direct (*continu*) ou indirect (*pointillé*) des isoprénoides volatiles (IPV) (*en noir*) contre les dommages oxydatifs résultant de ces stress (*en gris*). (1) Le caractère lipophile des IPV peut réduire le stress oxydant et l’accumulation des dérivés réactifs de l’oxygène ou de l’azote par la stabilisation des membranes en minimisant la peroxydation des lipides. (2) Les IPV pourraient interagir avec ces dérivés réactifs pour produire des espèces réactives électrophiles connues comme des inducteurs des défenses antioxydantes. (3) Le piégeage direct de ces dérivés réactifs empêche leur accumulation et par conséquent les dommages oxydatifs qui en résultent. Le stress oxydant causé par les stress environnementaux se manifeste par la production des dérivés réactifs de l’oxygène et de l’azote qui peuvent initier des transductions des signaux de manière directe ou par le biais des phytohormones et causer des dommages oxydatifs. Ensuite, les phytohormones déclenchent des cascades de signaux menant à la mort cellulaire programmée via des réactions d’hypersensibilité entraînant une sénescence accélérée qui se traduit par des nécroses tissulaires. Ce modèle du mécanisme protecteur des IPV a été bien discuté par [Vickers *et al.* \(2009\)](#), le rôle des dérivés réactifs de l’oxygène a été détaillé par [Choudhury *et al.* \(2017\)](#).

Les plantes voisines du cotonnier attaqué par *A. grandis* augmentent les niveaux de glucosinolate et d'anthocyanine pour se préparer à une défense directe, tandis que le cotonnier attaqué perçoit les quatre phéromones et augmente par conséquent l'émission de l' α -Pinène, β -Myrcène, (E)-Ocimène, Linalool, (E)-4,8-diméthylnona-1,3,7-triène, (E,E)-4,8,12-triméthyltridéca-1,3,7,11-tétraène, δ -Guaïène et salicylate de méthyle, des composés qui attirent *Bracon vulgaris* (Ashmead, 1894) l'ennemi naturel de *A. grandis*. Ainsi, les guêpes femelles utilisent leur venin pour paralyser les larves et arrêter leur développement en entraînant leur mort ([Magalhães et al., 2019](#)).

L'élaboration des phéromones d'agrégation à partir des monoterpènes a été observée chez *Dendroctonus frontalis* (Zimmermann, 1868), un ravageur du pin qui évite la réponse excessive des mâles à la Frontaline par la libération de Verbénone résultant de la conversion de l' α -Pinène. Cette capacité a été aussi rapportée pour *lps paraconfusus* avec sa bactérie intestinale symbiotique *Bacillus cereus* qui produit *cis* et *trans*-Verbenols à partir de l' α -Pinène pour attirer les femelles. Pour les plantes attaquées, le phénomène d'attraction des ennemis des insectes herbivores est une défense indirecte découverte il y a 30 ans et a été étudiée dans plus de 15 espèces végétales différentes ([Mann, 1987](#) ; [Degenhardt, 2008](#)).

L'augmentation de la production des monoterpènes peut être une défense directe contre des champignons pathogènes transmis par des insectes ravageurs. L'attaque sur *Pinus resinosa* Aiton par des scolytes vecteurs du champignon *Leptographium terebrantis* S.J. Barras & T.J. Perry a été étudiée par [Klepzig et al. \(1995\)](#). Des blessures de 12 mm de diamètre ont été effectuées pour simuler l'action ravageuse et d'autres blessures de mêmes diamètres inoculés avec une culture pure de *L. terebrantis*. Les concentrations de l' α -Pinène, Camphène, β -Pinène, 3-Carène, Myrcène et Limonène étaient toutes plus élevées chez les blessures inoculés que les blessures non infectées et après trois semaines de l'inoculation ces concentrations étaient encore plus élevées. Ces monoterpènes ont montré une activité biologique élevée envers ces insectes et champignons associés à la maladie du déclin du pin rouge.

Les plantes utilisent les épines, l'amertume des alcaloïdes et des tanins pour dissuader les grands herbivores et prévenir le surpâturage. Les monoterpènes peuvent jouer ce rôle malgré le fait que les herbivores sont attirés par l'odeur. La nature lipophile de ces composés les rend mal excrétés dans l'urine ou la bile contrairement aux composés polaires. Ces molécules seront donc réabsorbées et subissent des processus de fonctionnalisation ou de

conjugaison avec des enzymes comme les cytochromes P450 et la glucuronosyltransférase dans le foie ou le tube digestif. La fonctionnalisation consiste à ajouter des groupes fonctionnels R – H ou ROH alors que la conjugaison implique l'ajout direct des molécules endogènes comme le Glucuronide et le Glutathion pour augmenter la polarité ([Dearing et al., 2005](#)).

Malgré cette action défensive, les plantes peuvent profiter des herbivores pour la pollinisation et la dispersion des graines et peuvent aussi utiliser des terpénoïdes comme le β -Ocimène, considéré comme un attractif universel pour attirer des abeilles, des mouches, des chauves-souris, des papillons de nuit, des oiseaux et des fourmis (la pollinisation de *Retama sphaerocarpa* Boiss. et *Frankenia thymifolia* Desf. par *Camponotus foreli* Emery). Le potentiel d'attraction de certains composés a été prouvé, 1,8-Cinéol pour *Bombus terrestris* L., Linalool et (E, E)- α -Farnesène pour certains Andrènes et Bicyclogermacrène pour quelques Diptères ([Gómez et al., 1996](#) ; [Granero et al., 2005](#) ; [Giuliani et al., 2018](#)).

Entre la compétition et la facilitation, des études suggèrent que l'herbivorie et les stressés abiotiques non excessives affectent positivement l'interaction entre les espèces coexistantes. L'interaction facilitatrice est courante dans les environnements arides et souvent observée dans les associations végétales représentées généralement par des plantes pérennes ([Al-Namazi, 2019](#)). Par contre, des observations dans les écosystèmes arides montrent un potentiel allélopathique des adultes pérennes des familles des Astéracées et Lamiacées capable d'inhiber la germination et réduire la croissance de diverses plantes annuelles ([Friedman, 1987](#)).

Pendant l'été, *Salvia leucophylla* Greene et *Artemisia californica* Less. qui dominent le sud semi aride de la Californie produisent principalement le Camphre et le 1,8-Cinéol qui, absorbés par le sol, inhibent la germination des autres plantes au printemps suivant. C'est seulement après les feux de brousse résultant de la saturation de l'air avec des composés inflammables que ces phytotoxines seront détruites et les plantes annuelles pourront réapparaître ([Mann, 1987](#)).

L'effet d'allélopathie d'*Origanum dayi* Post, *Artemisia sieberi* Besser et *Artemisia judaica* L. a été lié respectivement à la présence de pourcentages élevés dans l'air et dans le sol d'1,8-Cinéol (39,2-49% et 21,5-38,7%), d' α -Pinène (8,8-9,1% et 7,7-18,3%) et de Camphre (2,1-4,8% et 7,4-8,9%) (Friedjung *et al.*, 2013). Les huiles essentielles de deux écotypes (de Lamerd et Zarghan en Iran) de *Zataria multiflora* Boiss. dominées par le Carvacrol et le Linalool (77,4% et 90,6% respectivement) ont exercées un effet inhibiteur significatif à des concentrations de 320 et 640 μ l/l sur la germination des graines d'*Hordeum spontaneum* K.Koch, *Secale cereale* L., *Amaranthus retroflexus* L. et *Cynodon dactylon* Pers. (Saharkhiz *et al.*, 2010).

Les terpénoïdes interviennent aussi dans des interactions avec des microorganismes ou d'autres agresseurs. Plusieurs études *in vitro* ont montré leurs pouvoirs antibactériens (Jerbi *et al.*, 2016 ; El Jery *et al.*, 2018), antifongiques (Makhloufi *et al.*, 2015 ; Elhouiti *et al.*, 2017), acaricides (Attia *et al.*, 2011), nématocides (Samoylenko *et al.*, 2008) et insectifuge (Demirci *et al.*, 2017). Alors que d'autres études ont trouvé que la présence des monoterpènes comme α -Pinène, β -Pinène, δ -3-Carène, Myrcène, Limonène et α -phellandrene dans le sol inhibe la minéralisation nette de l'azote et la nitrification nette par l'inhibition de la croissance des microbes responsables comme les espèces des genres *Nitrosospira*, *Nitrosomonas* et *Nitrosococcus* (Smolander *et al.*, 2012).

Monographie de *Rhanterium adpressum* Coss. & Dur.

2.1 Aspect botanique

Le nom du genre *Rhant(h)erium* s'écrit avec un *h* (Desfontaines, 1798) et sans *h* (Cosson, 1855 ; Battandier et Trabut, 1888), ce dernier est le plus utilisé. Dans le "*Catalogue of life checklist*", le nom accepté pour cette espèce est : *Rhanterium adpressum* (Desf.) Coss. & Dur. *Rhanterium* (Desfontaines, 1798) du grec : *ραντεριον* (ou aspergillum) "adapté pour l'arrosage" ; "rhanter" c'est celui qui arosé et "rhaino", arroser ou asperger, se référant aux graines (Quattrocchi, 1999). *adpress* -a, -um (L.) *ad* : à ; *presso* : presser. À siliques serrées contre l'axe de l'inflorescence. De "adprimere", pour apprimere, de *ad* : à, et *primere* : presser : serrer contre (Gentil, 1923).

Le genre *Rhanterium* sont des arbustes ou sous-arbrisseaux canescents, multicaules, très ramifiés, à tiges et feuilles revêtues de poils blanchâtres ; à feuilles alternes, petites, entières et un peu dentées très caduques ; à rameaux droits, nombreux, serrés en touffes, capitules hétérogames multifides, radiés, petits, à fleurs jaunes à involucre sphériques formés de plusieurs rangs de bractées ; ligules unisériées, femelles, tridentées ; fleurons hermaphrodites à 5 dents ; anthères sagittées, longuement appendiculées à la base, achaines étroits, cylindriques, à 4-5 côtes, les rangs externes à l'aisselle de paillettes et souvent chauves, les autres à 4-5 soies plumeuses (Battandier et Trabut, 1888 ; Quézel et Santa, 1963 ; Ozenda, 2004).

2.1.1 Synonymes

- *Rhanterium incrassatum* Pomel ex Batt. & Trab. (Battandier et Trabut, 1888);
- *Rhanterium squarrosum* Coss. & Dur. ex Batt. & Trab. (Battandier et Trabut, 1888);
- *Rhanterium suaveolens* ssp. *adpressum* Desf. (Quézel et Santa, 1963).

2.1.2 Classification¹

Règne :	<i>Plantae</i>
Sous-règne :	<i>Tracheobionta</i>
Superdivision :	<i>Spermaphyta</i>
Division :	<i>Magnoliophyta</i>
Classe :	<i>Magnoliopsida</i>
Sous-classe :	<i>Asteridae</i>
Ordre :	<i>Asterales</i> Lindl.
Famille :	<i>Asteraceae</i> Dumort.
Genre :	<i>Rhanterium</i> Desf.
Espèce :	<i>Rhanterium adpressum</i> Coss. & Dur.

2.1.3 Description

Arbuste, rigide, canescents, multicaules, ramifié, dressé à tiges et feuilles revêtues de poils blanchâtres, rameaux nombreux monocéphales à feuilles séparés, glabres, alternes, petites, entières et un peu dentées, les inférieures allongé-lancéolées, les supérieures lancéolées linéaires, grands capitules, multifleurs, hétérogames, fleurs de même couleur jaune, unisériées, femelles longuement ligulées, ligules planes et unisériées, tridentées; les centrales tubuleuses et hermaphrodites à 5 dents lancéolées (figure 2.1). Involucres subglobuleux, sphériques formés de plusieurs rangs de bractées appliquées. Réceptacle plan ou un peu convexe, plus ou moins paléacé. Akènes étroits, cylindriques, à 4-5 côtes; les marginaux situés à l'aisselle de paillettes et en général chauves; les centraux à aigrette constituée par

1. *Catalogue of Life*, (<https://www.catalogueoflife.org/data/taxon/4S3LC>, Consulté avec succès : 29 octobre 2021).

4-6 soies plus ou moins dilatées au sommet et plumeuses ([Cosson, 1855](#) ; [Battandier et Trabut, 1888](#) ; [Quézel et Santa, 1963](#) ; [Ozenda, 2004](#)).



FIGURE 2.1 – Illustrations de *R. adpressum*. A : Capitules, B : Pied de près de Laghouat (gps : 33.86153°N, 2.81938°E), C : Fleurs, D : Fleuron ligulé, E : Fleuron discoïde, F-H : Bractées de l'involucre, I : Paillette, J : Style de fleuron ligulé, K : Bractée involucre interne, L : Étamine, M : Style de fleuron discoïde (D-M : [Wiklund, 1986](#), modifié).

Dans les parcours sahariens, [Chehema et Abdelhamid \(2012\)](#) estiment la phytomasse (P en kg de matière sèche) de *R. adpressum* en fonction du recouvrement (R en m²) par l'équation de prévision : $P = 0,8926R - 0,022$, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,91$. Sur les graines de pollen de cette espèce, l'investigation de [Leins \(1971\)](#) a montré qu'il s'agit d'un type commun dans les Inulées sachant que le nombre de chromosomes $n=12$ a caractérisé cette espèce dans ce groupe où le nombre est généralement 10 ou 9 ([Reese, 1957](#) ; [Wiklund, 1986](#)).

Une coupe faite au niveau d'un rameau de *R. adpressum* a montré un parenchyme assimilateur qui s'organise en deux assises : une externe, à cellules allongées et une interne, à cellules cubiques. Ce parenchyme est séparé de l'épiderme par un hypoderme et s'éloigne de la surface du rameau par la présence des poils qui protègent les stomates. Les cellules de l'hypoderme, riches en cristaux d'oxalates de calcium sous forme de macles, empêchent la translocation de l'eau des couches cellulaires internes vers l'épiderme réduisant par conséquent la transpiration. D'autre part, les cellules cubiques de l'assise interne ont un nombre de chloroplastes et de mitochondries plus grand que dans les cellules allongées de l'assise externe. Ainsi le type de ce parenchyme optent pour la voie photosynthétique de type C4 (formation d'un acide à 4 atomes de carbone lors de la fixation de CO₂) qui semble constituer une adaptation à la sécheresse ([Houari et al., 2012](#)).

2.2 Aspect écologique

2.2.1 Interactions plante-insecte

Les plantes et les insectes sont étroitement associés à travers des relations mutualistes ou antagonistes. Ces interactions plante-insecte forment des systèmes dynamiques. Ces associations peuvent être, entre autres, dues à des facteurs physiques mais, essentiellement, par la chimie de la plante elle-même. Un insecte spécifique s'associe étroitement à une plante qui produit des composés chimiques caractéristiques jouant le rôle d'un attracteur ou stimulant qui va aider à trouver ou reconnaître l'hôte ([Renwick, 2001](#)). La présence ou l'absence des composés volatiles peut favoriser ces types d'attraction et, en combinaison avec d'autres composés, ils peuvent signaler l'aptitude d'une plante donnée à accepter la ponte ou l'alimentation d'un insecte spécifique ([Renwick, 2001](#)). L'interaction du *R.*

adpressum a été rapportée avec deux insectes dont le premier est un lépidoptère et le second un coléoptère :

— *Ptocheuusa multistrigella* (RAGONOT, 1893)

Quelques sujets capturés en avril 1907 et d'autres en mars et avril 1912, à Biskra ; chenille pendant l'hiver, dans les capitules du *Rhanterium adpressum*, dont elle mange les graines ; elle se transforme dans un petit cocon soyeux blanc, au centre du capitule ([Chrétien, 1916](#)).

C'est une chenille ovoïde. Elle présente des incisions segmentaires très accusées avec segments renflés au milieu ; blond roux sur le dos, blanc crème sous le ventre ; poils blancs ; tête blanche ; organes buccaux brun roux foncé ; pattes écailleuses nulles, remplacées par un très petit bouton ou mamelon. Elles sont membraneuses et rudimentaires, réduites à un petit bouton à couronne rousse, sans crochets distincts. Chrysalide brun jaunâtre ; extrémité des enveloppes libre et atteignant le mucron ; surface lisse, luisante ; poils blonds, à la place des verruqueux ; stigmates très petits, les deux derniers un peu mamelonnés ; mucron subconique, court, tronqué, inerme ([Ragonot, 1892](#) ; [Chrétien, 1916](#)).

— *Thyreogonia costata* (LUCAS, 1858) (Syn : *Oxythyrea costata* LUCAS, 1858 ; *Epicometis costata* BEDEL, 1889)

C'est une espèce exclusivement africaine ([Bedel, 1889](#)), noir, luisant, un peu rougeâtre. Le premier article des tarses postérieurs est fortement denté. Protibias tridentés. Clypéus bilobé. Une tache blanche derrière chaque œil. Quatre taches blanches de chaque côté du milieu du pronotum (ici, elles sont fusionnées), les marges latérales blanches. Elle ressemble un peu à l'*Enoplotarsus deserticola*, mais elle est bien moins allongée et proportionnellement plus large. De plus, les taches blanches qui ornent les élytres sont plus grandes, moins nombreuses et plus irrégulièrement disposées ([Lucas, 1858](#)).

2.2.2 Interactions plante-herbivore

Avec des valeurs nutritives importantes (figure [2.2](#)) et des teneurs en eau relativement élevées, le *R. adpressum* fait partie des plantes fourragères qui sont consommées par les dromadaires, dans des proportions à peu près égales en toute saison. Entre 1955-56,

Gauthier-Pilters (1961) a enregistré ses observations, dans la région de Béni Abbès, sur la nourriture des dromadaires composée d'environ 90 plantes distribuées dans trois types de pâturage : hamada, erg et Oued Saoura. À Djebel Bet Tuaris, pour 13 dromadaires pendant 55 heures, 2966 grammes de *R. adpressum* ont été ingérés en 741 bouchées, 1781 grammes en 223 bouchées, par 3 dromadaires, en 11 heures à Oued Daiet el Oussakh, 503 grammes en 63 bouchées par 11 dromadaires en 47 heures à Oued Fares, 252 grammes en 28 bouchées par 9 dromadaires en 23,5 heures à Hamada du Guir (Djebel Zeghamra). Il a été observé que les dromadaires ont une préférence pour les arbustes feuillés et attractifs, dans la saison sèche, mais la composition en phénols et tannins peut affecter la dégradabilité des protéines dans le rumen, malgré que les dromadaires se montrent adaptés et tolérants (Dereje et Udén, 2005).

2.2.3 Interactions plante-plante

L'association de *R. adpressum* a été rapportée avec deux espèces : *Retama raetam* (Forssk.) Webb et *Thymelaea microphylla* Coss. & Dur. (Bonnet et Doumet-Adanson, 1896 ; Ozenda, 2004). Représentant un aspect fondamental de la communauté écologique d'une plante. Ces associations peuvent donner des informations sur l'hétérogénéité environnementale et les interactions biotiques (Saiz et Alados, 2012). Dans un écosystème donné, à la recherche de l'eau, des éléments nutritifs du sol et la protection des herbivores, les plantes peuvent être mutualistes, commensales et parasites engendrant des coévolutions induites directement ou indirectement par ces interactions (Tirado et al., 2015).

Le mutualisme interspécifique représente l'un des plus important et largement abordé des interactions en écologie. citons le cas de *Retama sphaerocarpa* Boiss. et *Marrubium vulgare* L.. Quand grandir ensemble, ces deux espèces ont une productivité élevée, plus d'azote dans les tissus des feuilles et un bon état physiologique (Pugnaire et al., 1996). Ce genre d'interactions existe aussi entre *Pistacia atlantica* Desf. et *Ziziphus lotus* Lam. (Benhassaini et al., 2007). Dans le désert des Mojaves en Californie, Holzapfel et Mahall (1999) ont trouvé que dans l'association des espèces annuelles avec l'arbuste *Ambrosia dumosa* Payne une interaction positive a caractérisé la survie, la production de biomasse et graines, des interactions décrites comme des effets nettement positifs et de facilitation.

2.3 Aspect biochimique

2.3.1 Composition chimique des parties aériennes de *R. adpressum*

En s'adaptant à son environnement aride ou saharien, le *R. adpressum* a montré une variabilité saisonnière de la composition chimique de ses parties aériennes (Chehema et Youcef, 2009). Une composition caractérisée par une richesse en composés pariétaux et en cellulose brute et de faibles teneurs en matières azotées totales (MAT) et tannins. En automne et en hiver des fortes teneurs sont enregistré pour NDF, ADF, ADL et CBW (53,57 et 54,44, 44,05 et 41,71, 25,95 et 16,06, 36,26 et 38,50 respectivement) alors que des teneurs élevées en MM (26,47) et faibles en MO et MAT (26,47 et 73,54) ont caractérisé la période d'été (figure 2.2).

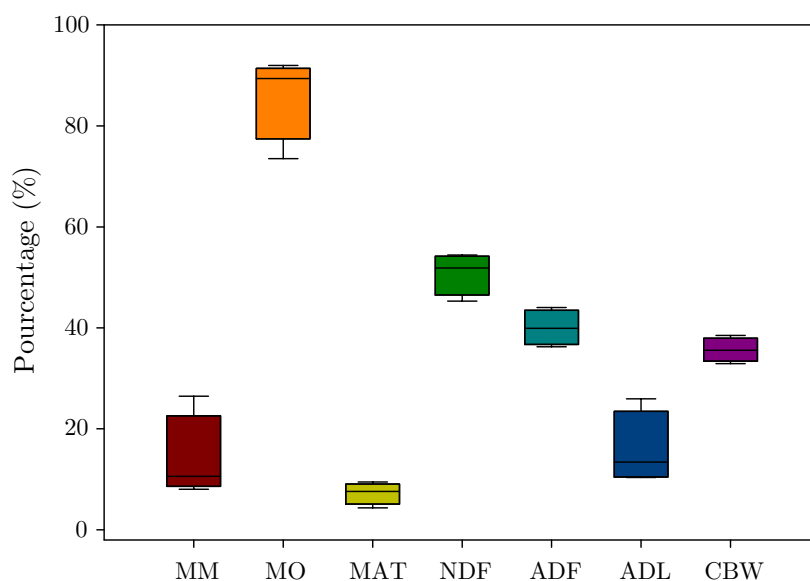


FIGURE 2.2 – La variation saisonnière de la composition chimique en pourcentage de la matière sèche. MAT : matières azotées totales, ADL : *Acid Detergent Lignin*, CBW : cellulose brute de Weende, MM : matière minérale, ADF : *Acid Detergent Fiber*, NDF : *Neutral Detergent Fiber*, MO : matière organique (Chehema et Youcef, 2009).

La teneur lipidique brute a représenté seulement 2,97% de la matière sèche des fleurs de *R. adpressum*, dans laquelle une dominance des acides gras saturés (80,4%) où les grands pourcentages sont pour les acides palmitique et stéarique (47,4 et 11,5%, respectivement) est suivie d'un faible pourcentage d'acides gras insaturés tels que l'acide oléique (12,9%), l'acide linoléique (5,5%) et l'acide linoléique (1,1%) (Hamia et al., 2013).

Pendant deux ans, les travaux de [Boussoussa *et al.* \(2016\)](#) sur les composés phénoliques des fleurs de *R. adpressum* collectées en trois mois, ont révélés des teneurs variables allant de 5,5 à 22,8 mg GAE/g dans les extraits méthanoliques et de 8,7 à 14,2 mg GAE/g dans les extraits acétoniques, avec des moyennes de 12,3 et 11,8 mg GAE/g pour les deux extraits, respectivement (figure 2.3).

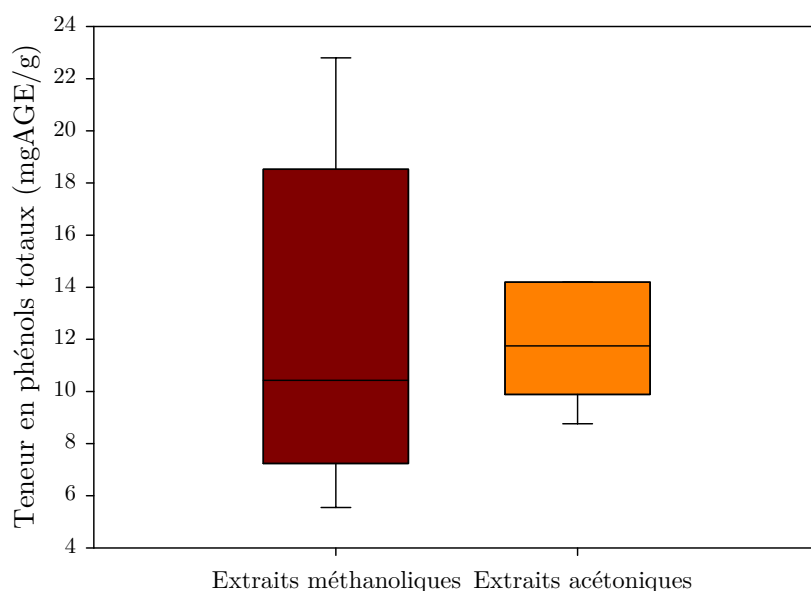


FIGURE 2.3 – La variation des teneurs en phénols totaux dans les deux extraits méthanolique et acétonique de fleurs de *R. adpressum* collectées en trois mois, pendant deux ans (2011 et 2012) ([Boussoussa *et al.*, 2016](#)).

Dans une étude précédente ([Elhouiti *et al.*, 2017](#)), les huiles essentielles de *R. adpressum* ont montré une variation temporelle, spatiale et même entre les organes (feuilles et fleurs). Selon le mois d'extraction, les pourcentages totaux des monoterpènes dans les fleurs varient entre 43.87 et 59.48 % avec une moyenne de 50,94%. D'autre part, les sesquiterpènes varient entre 4,79 et 13,55 %, avec une moyenne de 9,11 % (figure 2.4). Pour les feuilles, les totaux des monoterpènes dans la même période de collecte et d'extraction varient entre 29,62 et 74,75 % avec une moyenne de 62,46 % et les sesquiterpènes entre 6,24 et 12,58 % avec une moyenne de 8,54 % .

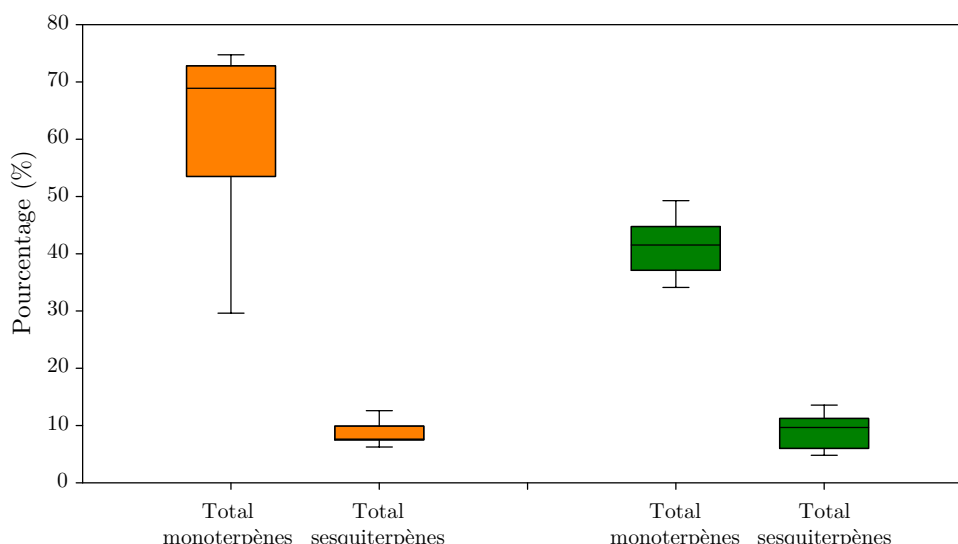


FIGURE 2.4 – La variation des pourcentages des familles des monoterpènes et sesquiterpènes des huiles essentielles de feuilles (à gauche) et de fleurs (à droite) de *R. adpressum* collectés en trois mois pendant trois ans (2011-2013) (Elhouiti *et al.*, 2017).

2.3.2 Activités biologiques des métabolites secondaires de *R. adpressum*

L'évaluation de l'activité antioxydante des métabolites secondaires extraits des fleurs de *R. adpressum* par le test DPPH a montré un faible pouvoir réducteur des huiles essentielles quel que soit la région de récolte avec une $CI_{50} > 20$ mg/ml (Elhouiti, 2009). Avec une $CI_{50} = 7,1$ mg/ml, l'extrait lipidique a un pouvoir réducteur ≈ 17 fois meilleur que les huiles essentielles (Hamia *et al.*, 2013) mais les extraits phénoliques ont révélé une activité antioxydante importante par rapport aux références utilisés et pour les deux fractions : acétone/eau et méthanol/eau ; les valeurs de CI_{50} variant généralement entre 0,01 et 0,013 mg/ml (Boussoussa, 2010).

Contrairement à l'activité antioxydante, l'activité des extraits phénoliques d'acétate d'éthyle et butanoliques sur dix souches microbiennes est considérée modérée. Boussoussa (2010) a noté l'absence de l'inhibition pour les cinq souches *Staphylococcus aureus*, *MRSA*, *Klebsiella pneumoniae*, *Candida albicans* et *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* et à des CMI entre 0,3 et 0,7 mg/ml. Les souches *Bacillus cereus*, *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* et *Salmonella typhi* ont révélé plus de sensibilité, surtout pour l'extrait d'acétate d'éthyle. En effet, les bactéries à Gram négatif et *C. albicans*

s'avèrent aussi résistantes aux huiles essentielles de *R. adpressum* à l'opposé des bactéries Gram positif qui montrent plus de sensibilité avec des CMI entre 0,1 et 0,8 mg/ml (Elhouiti, 2009). Avec une inhibition de la croissance allant jusqu'à 92,4 %, *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* s'est montrée très sensible aux huiles essentielles par la méthode de contact direct avec des CMI entre 1 et 2 μ l/ml selon la région (Elhouiti et al., 2016).

Les composés phénoliques des fleurs ont été aussi testés pour leur pouvoir inhibiteur de l'activité enzymatique de l' α -amylase d'*Aspergillus oryzae*. Pour 100 μ l de l'extrait aqueux, le taux d'inhibition de l'activité enzymatique était à 76,75% (Khacheba et al., 2014).

Elhouiti et al. (2017) ont investigué l'effet des huiles essentielles des feuilles et des fleurs de *R. adpressum* sur la croissance et la production des mycotoxines de quatre souches de *Fusarium culmorum* et *Fusarium graminearum*. L'inhibition de la croissance fongique par les deux extraits était importante dans la culture sur milieu solide où les CI50 étaient de 0,27 et 1,5 μ l/ml et dans la culture en milieu liquide, ces concentrations sont de 0,2 à 0,37 μ l/ml sachant que les CMI pour tous les essais n'ont pas dépassés 13,5 μ l/ml. La production des trichothécènes B a été inhibée à une concentration de 0,25 μ l/ml. L'inhibition a pu atteindre 76, 97 et 100%, surtout avec les huiles essentielles des fleurs.

Ce pouvoir inhibiteur de la production des mycotoxines a été suggéré du à l'analogie structurale entre les sesquiterpènes de l'huile essentielle et les substrats (15-décalonecitrine) et les produits (déoxynivalénol) des enzymes clés dans leur biosynthèse comme 15-*O*-trichothécènes acétyltransférase et 3-*O*-trichothécènes acétyltransférase. L'étude *in silico* a montré que T-Muurolol et α -Eudesmol sont les meilleurs inhibiteurs, avec des affinités élevées, comparées aux 15-décalonecitrine et déoxynivalénol (Elhouiti et al., 2020).

Matériels et méthodes

Matériels et méthodes

3.1 Modélisation de la distribution de la tribu des Inulées

En 1821, CASSINI H. publia son tableau méthodique des genres de la tribu des Inulées et suivant sa méthode de classification, il a divisé les Inulées en trois sections : la première appelée Inulées-Gnaphaliées, la deuxième Inulées-Prototypes et la troisième Inulées-Buphthalmées (Cassini, 1821). À l'intérieur de ces trois sections, il compta 75 genres. Depuis cette date, ce chiffre a continué d'augmenter jusqu'à 245 genres soit 2600 espèces. Du fait que cette tribu soit distribuée dans le monde entier, a été considérée la plus grande dans les composées et la troisième plus grande dans les familles végétales (Anderberg, 1989 ; Arriagada, 1998).

3.1.1 Collection des données et traitement

Les points de présence des espèces de la tribu des Inulées en Algérie ont été extraits des herbiers numérisés du Muséum National d'Histoire Naturelle de France (MNHN) et des études universitaires Algériennes. Ainsi un total de 99 points de présence pour 30 espèces et sous-espèces ont été définis (Annexe B.1). La recherche de ces espèces a été basée premièrement sur les travaux de Battandier et Trabut (1888), suivie d'une vérification des noms scientifiques par "*Catalogue of life checklist*". Le site web Geoplaner était utilisé pour géo-référencer les enregistrements d'herbier, les coordonnées des points de présence ont été vérifiées conformément à Hijmans *et al.* (1999) et sont considérées comme correctes.

Les données climatiques ont été téléchargées de la version 2 de WorldClim ([Hijmans et al., 2005](#)). Ce sont des données moyennes mensuelles de la température minimale, moyenne et maximale et la précipitation de 1970-2000 disponible à une résolution spatiale de 1 km. Au total 19 variables bioclimatiques de WorldClim, dérivées des données mensuelles du climat, ont été utilisées dans la prédiction de la distribution potentielle des espèces de la tribu des Inulées. Certains d'entre eux sont des paramètres climatiques basiques, d'autres intègrent des aspects de saisonnalité et d'autres pour des facteurs environnementaux limitant.

La distribution des espèces de la tribu des Inulées et l'évaluation de l'habitat ont été déterminées par la méthode de maximum d'entropie (MaxEnt version 3.4.1) ([Phillips et al., 2006](#)) avec sa très bonne performance surtout avec les échantillons de petite taille ([Elith et al., 2006](#)). MaxEnt utilise les données de présence pour calculer la niche effective et la probabilité d'occurrence d'une espèce en se basant sur la théorie de maximum d'entropie. Selon les deux zones, Tell ou Sahara, deux modèles de distribution ont été exécutés avec une itération maximale à 500, un multiplicateur de régularisation en valeur par défaut (1) et en format de sortie ASC logistique. Le reste du paramètre de ces modèles a été utilisé par défaut.

Les résultats de MaxEnt présentés constituent la moyenne de 10 réplifications randomisées, pour chaque modèle. Le test Jackknife a été effectué pour mesurer l'importance de chaque variable dans les modèles. Le pouvoir prédictif des modèles a été évalué par la Surface Incluse sous la Courbe (en anglais : AUC) de la courbe *Receiver Operating Characteristic* (ROC) pour les points de présence qui ont été divisés en 80% de données de formation (*training dataset*) et 20% de données de test. Pour prédire la convenance de l'habitat dans les conditions futures, une projection climatique a été réalisée jusqu'en 2070, avec les données du modèle du système climatique communautaire (CCSM), à une résolution de 30 secondes pour tous les scénarios d'émission de gaz à effet de serre : RCP 2.6, 4.5, 6.0 et 8.5 avec la règle d'application de seuil *10 percentile training presence*.

3.2 Distinction de la distribution de *R. adpressum*

En Algérie, le genre *Rhanterium* comporte trois espèces (*R. adpressum*, *R. intermedium* et *R. suaveolens*) occupant des habitats différents réparties de l'ouest à l'est. [Wiklund](#)

(1986) a indiqué cette distribution, en se basant sur les localités des spécimens conservés dans neuf collections d'herbiers. Ici, la convenance des habitats des trois espèces a été modélisée dans le but de distinguer et comparer leurs zones de distribution et de déterminer les variables bioclimatiques qui les caractérisent.

3.2.1 Zone d'étude et occurrence des espèces

La zone d'étude s'étale de l'Ouest à l'Est de l'Algérie (-4.7°E - 7.5°E , 29°N - 35°N) avec un climat aride ou hyperaride qui caractérise les terres au sud de l'Atlas Saharien jusqu'au nord du Sahara. Les espèces investiguées dans cette zone sont *Rhanterium suaveolens* Desf. (1799), *Rhanterium adpressum* Coss. & Dur. (1855) et *Rhanterium intermedium* Pomel (1874). Ce dernier c'est un hybride qui a une morphologie intermédiaire entre les deux premières espèces et il avait un synonyme *Rhanterium suaveolens* Desf. ssp. *intermedium* (Pomel) Quezel & Santa (1963).

Les points de présence ont été collectés à partir des herbiers numérisés du Muséum National d'Histoire Naturelle de France¹, en plus de nos propres observations. 110 points ont été obtenus pour *R. adpressum* qui sont généralement de Béchar (-3.7 - 0.4°E , 29.6 - 32.2°N), Naâma (-1.1 - 0.1°E , 32.3 - 33°N) et Laghouat (2 - 3°E , 33.2 - 33.9°N). Pour *R. suaveolens* et *R. intermedium*, 100 points ont été utilisés pour la prédiction des habitats convenables. La vérification des noms scientifiques a été faite par *International Plant Names Index*² et la géoréférenciation des points d'occurrence a été faite sur le site web Geoplaner³.

3.2.2 Prédicteurs bioclimatiques et modélisation

Cette étude a été basée sur la technique des données de "présence seulement" qui est favorisée à la technique de collection des données de "présence-absence" (Pramanik *et al.*, 2018). Dix-neuf (19) variables bioclimatiques plus le facteur d'altitude ont été utilisés pour établir le modèle de distribution et l'analyse de la convenance de l'habitat. Ce sont des variables dérivées de la température et les précipitations. Elles indiquent, en générale, les tendances de ces deux paramètres. Elles sont considérées écologiquement plus sensibles pour démarquer les tolérances physio-écologiques de l'habitat comparées aux simples

1. (<https://science.mnhn.fr/institution/mnhn/collection/p/item/search>), consulté avec succès : 09 octobre 2021

2. (www.ipni.org), consulté avec succès : 09 octobre 2021

3. (www.geoplaner.com), consulté avec succès : 09 octobre 2021

variables de température et de précipitations (Graham et Hijmans, 2006 ; Pramanik *et al.*, 2018).

Ces vingt (20) variables ont été téléchargées du site web WorlClim¹ version 2 avec une résolution de 30 arc seconds (~ 1 km). Ces données sont les résultats d'interpolation des enregistrements historiques (1970-2000) des température et précipitations mensuelles.

La modélisation de la distribution des espèces de *Rhanterium* a été réalisée avec MaxEnt 3.4.1 qui donne de bons résultats, même pour les petites échantillons (Phillips *et al.*, 2006 ; Elith *et al.*, 2006). L'évaluation des modèles obtenus a été faite par la surface incluse sous la courbe (AUC) qui varie entre 0 to 1 où un modèle avec $AUC \geq 0,9$ est considéré de haute performance (Thuiller *et al.*, 2005). Les courbes de réponses des espèces étudiées envers les variables bioclimatiques ont été générées par la moyenne avec la déviation standard de 10 réplifications de validation croisée. Certaines courbes ont été redessinées avec SigmaPlot 12.5 pour les présenter dans les résultats.

3.3 Première collecte de *R. adpressum*

Dans l'étude d'Elhouiti *et al.* (2017), la composition chimique des huiles essentielles obtenues en trois mois successifs (avril, mai et juin) de la fin du cycle phénologique de *R. adpressum* a montré des pourcentages élevés de monoterpènes au mois de mai dans les feuilles et les fleurs puis diminuent en juin vers la fin de la floraison. Dans cette partie, une investigation a été faite pour vérifier la variation de cette composition depuis le début du cycle végétatif en automne jusqu'au mois de mars.

3.3.1 Collecte et extraction des huiles essentielles

La collecte des parties aériennes de *R. adpressum* a été répartie sur cinq mois successifs (novembre-mars) de trois sites différents dans le sud algérien. Les coordonnées, les altitudes et le caractère climatique de ces sites sont présentés dans la figure 3.1. Ces sites sont dans une région de climat hyperaride caractérisée par une amplitude thermique pouvant atteindre $38,6^{\circ}\text{C}$ et une somme de précipitations annuelles d'environ 67,3 mm. Les échantillons ont

1. (www.worldclim.org), consulté avec succès : 09 octobre 2021

été séchés à l'ombre puis les feuilles sont séparées pour l'extraction des huiles essentielles avec hydro-distillation en utilisant un appareil de type Clevenger (Clevenger, 1928). Les huiles obtenues ont été traitées avec du sulfate de sodium anhydre et conservées à +4 °C.

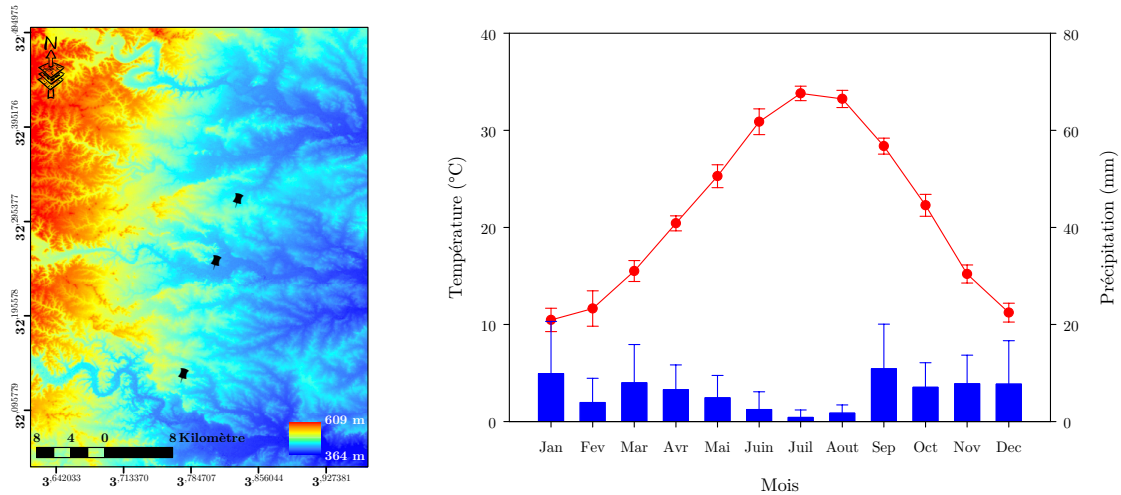


FIGURE 3.1 – Présentation des sites de collecte de *R. adpressum*. À gauche : carte d'élévation de la région d'étude. À droite : diagramme ombrothermique des trois sites de la période : 2011-2018¹.

3.3.2 Analyses chromatographiques CG-DIF

Les analyses chromatographiques des composés volatils ont été effectuées, au Laboratoire de recherche des Sciences Fondamentales à l'université de Laghouat, à l'aide d'un appareil de la chromatographie en phase gazeuse de type GC-5400, équipé d'un Détecteur à Ionisation de Flamme (DIF) et une colonne capillaire en silice fondu de type DB-5 (30m × 0,32 mm, épaisseur du film de 0,10 µm). Le gaz vecteur utilisé est l'hydrogène avec un débit de 1 ml/min. La température de la colonne est programmée à raison d'une montée de 5°C/min de 50°C à 250°C. La température de l'injecteur et celle du détecteur a été fixée à 250°C à 280°C, respectivement. Les solutions des huiles essentielles sont préparées, en dissolvant 10 µl de chaque HE dans 1 ml du solvant organique pentane. Les indices de rétention linéaire des constituants sont calculés par rapport à une série d'alcane (C8 à analysée dans les mêmes conditions opératoires que celles des échantillons.

1. Les données climatiques de précipitation et de température ont été obtenues de l'Unité de Recherche Climatique (CRU) V4.03 à une résolution de 0,5 degré : <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/10d3e3640f004c578403419aac167d82> (Consulté avec succès : 09 octobre 2021).

L'identification des composés d'huiles essentielles était basée sur la comparaison des indices de rétention (IR) avec ceux rapportés dans la littérature ([Babushok *et al.*, 2011](#)).

3.3.3 Analyse chimiométrique

Les chromatogrammes des quinze échantillons ont été exportés en format CSV. Ce sont des données chromatographiques (temps et intensité) formant une matrice de 15 colonnes et 83631 lignes. Ensuite, avec le logiciel SpecAlign 2.4.1, les chromatogrammes ont été lissés, en utilisant l'algorithme Savitzky-Golay. Les bruits ont été réduits et la ligne de base a été attribuée. Les chromatogrammes ont été alignés avec Chemospec de R. L'analyse en composantes principales a été réalisée pour montrer la variation entre les trois sites de récolte.

Les spectres d'absorption UV-Vis des 15 échantillons de l'huile essentielle des trois régions ont été mesurés (après une dilution 1 :400, v/v dans du méthanol) à une longueur d'onde de 200 à 600 nm avec un spectrophotomètre contrôlé par ordinateur Shimadzu UV-1800. L'analyse des spectres d'absorbance UV-Vis ($\lambda = 285-410$ nm) des 15 échantillons a été faite avec Specmine de R et des fonctions de Chemospec, Hyperspec et ggplot2, selon la méthode décrite par [Lopes *et al.* \(2017\)](#).

3.3.4 Analyse du sol

Le pH a été mesuré avec d'un pH-mètre dans une suspension d'eau, avec un rapport sol/eau égale à 1/2,5. La conductivité électrique (CE) a été déterminée par un conductimètre à une température de 25°C, avec un rapport sol/solution de 1/5. Le taux de carbonate de calcium (CaCO_3) a été déterminé par la méthode volumétrique qui consiste à une attaque acide du sol par l'acide chlorhydrique (HCl), suivie d'un titrage de l'excès d'HCl par la soude (NaOH), en présence de phénophtaléine qui permet le virage du mélange en passant du transparent au rose. Le dosage de l'azote total (N) a été fait par la méthode de Kjeldahl, le potassium (K^+) par un spectromètre à flamme et le phosphore (P) par la spectrométrie. La granulométrie des échantillons a été réalisée par la pipette de Robinson, en se basant sur la loi de Stokes ([Annexe C.1](#)).

3.4 Deuxième collecte de *R. adpressum*

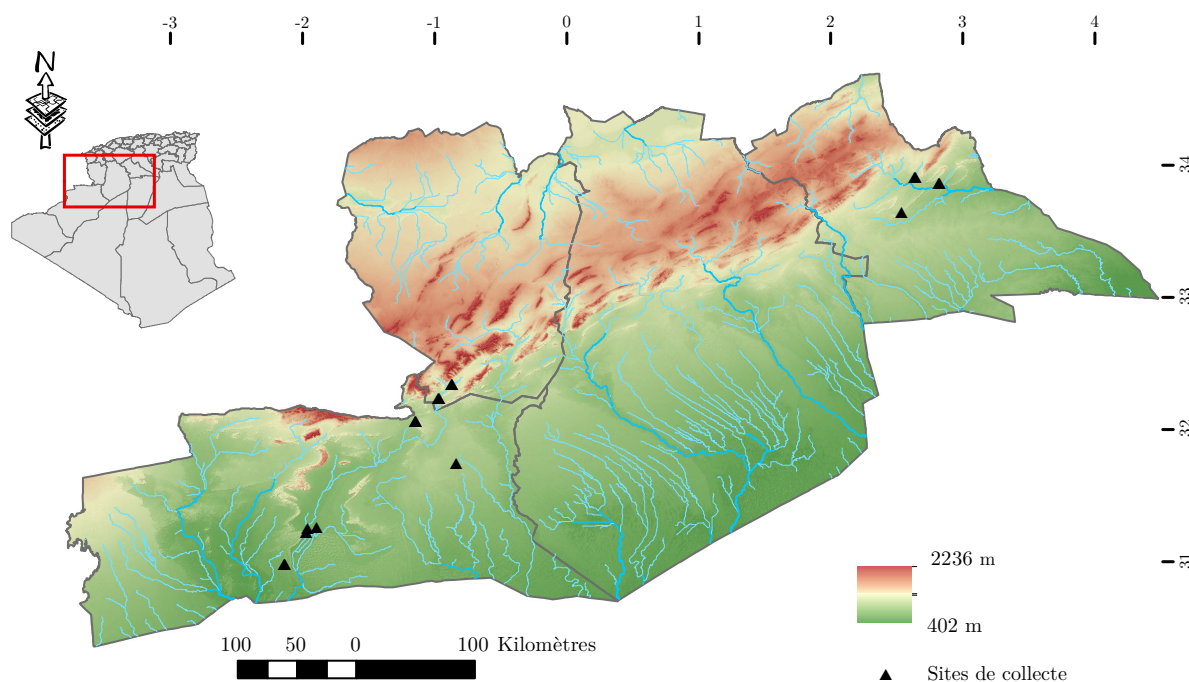
La variation de la composition chimique des huiles essentielles a fait l'objectif de très nombreuses études ces dernières années. C'est une variation inter-spécifique entre les membres du même genre, mais surtout la variation intra-spécifique qui était largement étudiée afin de pouvoir distinguer des races chimiques, entités chimiques, chémodesmes ou chémotypes au sein des populations de la même espèce d'une apparence extérieure identique mais différents les uns des autres par leurs constituants chimiques (Evans, 2002).

Aujourd'hui, les termes chémodesme et chémotype sont conventionnellement utilisés pour désigner les populations chimiquement distinctes au sein d'une espèce donnée. La terminologie de "dème" (du grec *δημος*) a été introduite par Gilmour et Gregor (1939) pour définir le groupe d'individus d'un taxon spécifique occupant un habitat écologique déterminé. Plus tard, Tétényi (1967) a utilisé le préfixe "chémo" avec "dème" pour construire le terme "chémodème" qui désigne un taxon chimique intra-spécifique.

Elhouiti (2018) a entamé l'étude de la variabilité de la composition chimique des huiles essentielles de *R. adpressum* dans ses aspects temporel (voir la sous-section 2.3.1) et spatial par l'étude des populations de Laghouat et Ghardaïa. Le but dans cette partie est de comparer la composition chimique des huiles essentielles des populations de Laghouat avec celles de l'extrême ouest de l'Algérie pour révéler les groupes chimiques pouvant constituer des chémotypes.

3.4.1 Collecte et extraction des huiles essentielles

La collecte a été faite au mois de mars 2021 dans trois régions : Laghouat (La), Naama (Na) et Béchar (Be) (figure 3.2). Les échantillons ont été séchés à l'ombre, ensuite les feuilles ont été séparées pour l'extraction des huiles essentielles. L'hydrodistillation avec un appareil de type Clevenger a été utilisé pour extraire les huiles essentielles (Clevenger, 1928). La teneur en huile essentielle a été estimée par le rapport de volume en ml dans un kg de matière sèche. Les huiles ont été conservées à +4°C jusqu'à l'analyse chromatographique.

FIGURE 3.2 – Présentation des sites de collecte de *R. adpressum*.

3.4.2 Analyse chromatographique CG-DIF

L'analyse chromatographique a été effectuée à l'aide d'un appareil de la chromatographie en phase gazeuse de type GC-5400, équipé d'un Détecteur à Ionisation de Flamme (DIF) et une colonne capillaire en silice fondue de type DB-5 (30 m×0,32 mm, épaisseur du film de 0,10 μm). Le gaz vecteur utilisé est l'hydrogène avec un débit de 1 ml/min. La température de la colonne est programmée en mode isotherme de 1 min jusqu'à 60°C suivie d'une montée à raison de 5°C/min jusqu'à 260°C, puis en mode isotherme de 5 min. La température de l'injecteur et celui du détecteur ont été fixées à 230°C et 250°C, respectivement. Les solutions des huiles essentielles sont préparées, en dissolvant 10 μl de chaque HE dans 1 ml du solvant organique pentane. Les indices de rétention linéaire des constituants sont estimés par rapport à une série de n-alcanes (C8 à C20) analysés dans les mêmes conditions opératoires que celles des échantillons. L'identification des composés d'huiles essentielles était basée sur la comparaison des indices de rétention (IR) avec ceux rapportés dans la littérature ([Babushok et al., 2011](#)).

3.4.3 Analyse statistique

Les données climatiques de température maximale, température minimale et humidité relative du mois de mars 2021 à 2 mètres au-dessus de la surface du sol ont été téléchargées du site POWER data¹ du projet de météorologie de surface et d'énergie solaire de la NASA. Les données d'altitude ont été obtenues du programme japonais ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) en rasters d'une résolution de 30 m². L'analyse en composantes principales de type Pearson (n) et l'analyse ascendante hiérarchique avec la méthode de liaison complet et la méthode euclidienne de distance ont été réalisées avec XLSTAT 2014.5.03 et Minitab 17.3.1. La comparaison des moyennes a été faite avec l'analyse de la variance (ANOVA one way) en utilisant le test de Tukey à un seuil de signification de 0,05.

1. (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>), consulté avec succès : 06 Novembre 2021.

2. (https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/#section_4), consulté avec succès : 09 octobre 2021.

Résultats et discussion

Résultats et discussion

4.1 Modélisation de la distribution de la tribu des Inulées

4.1.1 Distribution dans les conditions climatiques actuelles

Deux modèles de distribution ont été obtenus pour les espèces du Tell (modèle 1) et du Sahara (modèle 2). Les valeurs moyennes du test AUC des points de présence après 10 réplifications étaient, respectivement, de $0,987 \pm 0,01$ et $0,971 \pm 0,02$; indiquant une très bonne performance par rapport aux modèles générés de manière aléatoire. Les modèles de distribution potentielle obtenus sont présentés dans la figure 4.1. Les résultats de MaxEnt indiquent que les variables environnementales hautement contributives dans le modèle 1 (Tableau 4.1) étaient BIO19 (précipitations du trimestre le plus froid) avec 66,1%, BIO18 (précipitations du trimestre le plus chaud) avec 10%, BIO17 (précipitation du trimestre le plus sec) avec 12,8%.

En revanche, les variables à forte contribution dans le modèle 2 étaient BIO4 (saisonnalité de la température) avec 33,1%, BIO2 (plage diurne moyenne annuelle) avec 20,7%, BIO17 (précipitations du trimestre le plus sec) avec 12,8% et BIO14 (précipitations du mois le plus sec) avec 12,4%. Les contributions cumulées de ces variables bioclimatiques étaient, respectivement, de 83,8% et 79% pour les deux modèles. Les résultats du test jackknife ont révélé que d'autres paramètres avaient plus de contribution pour une valeur AUC plus élevée comme BIO2, BIO7, BIO12, BIO13, BIO14 et BIO16, pour le modèle 1, et BIO3, BIO9, BIO17 et BIO19, pour le modèle 2.

Le modèle MaxEnt a identifié les occurrences possibles comme des sites où les conditions étaient similaires à celles où les espèces se sont présentées naturellement, en utilisant des points de présence. Les valeurs moyennes de l'AUC reflètent la signification et le pouvoir prédictif des deux modèles engendrés (Araújo *et al.*, 2005). Les modèles de prédiction de la distribution des espèces de la tribu des Inulées, représentés sur la figure 4.1, montrent des habitats convenables pour les espèces du Tell dans le nord de l'Algérie et des habitats convenables pour les espèces sahariennes dans le centre et le sud de l'Algérie ainsi que d'autres habitats de faible convenance, qui sont des sites de possibilités d'occurrence très faibles, tenant compte des limitations de dispersion telles que les barrières géographiques (Atlas Tellien et Atlas saharien) et la pression anthropique, qui peuvent affecter la présence des espèces, même dans des conditions climatiques favorables (Stambouli-Meziane et Bouazza, 2012 ; Sitayayeb et Belabbes, 2018).

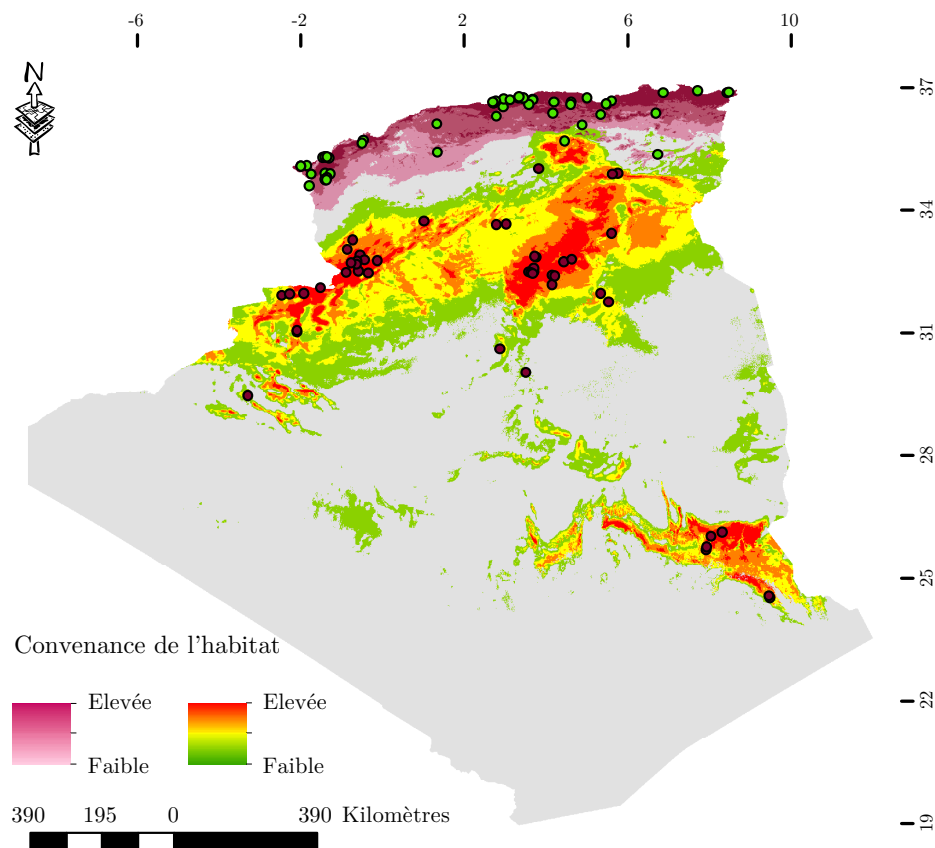


FIGURE 4.1 – Modèle de la distribution potentielle des espèces de la tribu des Inulées en Algérie.

TABLEAU 4.1 – Contributions relatives des variables bioclimatiques dans les modèles de MaxEnt. Les valeurs sont les moyennes de 10 réplifications. Les valeurs du test Jackknife sont exprimées en AUC pour les modèles, en utilisant chaque variable seule.

Variables	Tell		Sahara	
	Pourcentage de contribution	Jackknife d'AUC	Pourcentage de contribution	Jackknife d'AUC
BIO1 Température moyenne annuelle	0,2	0,92	0	0,7
BIO2 Écart diurne moyen	4,9	0,94	20,7	0,89
BIO3 Isothermalité (BIO1/BIO7)*100	0,1	0,66	5,7	0,92
BIO4 Saisonnalité de la température (Coefficient de variation)	0,6	0,86	33,1	0,77
BIO5 Température maximale de la période la plus chaude	1,2	0,9	0	0,84
BIO6 Température minimale de la période la plus froide	2,5	0,74	0,1	0,6
BIO7 Écart annuel de température (BIO5-BIO6)	0,6	0,91	3,1	0,7
BIO8 Température moyenne du trimestre le plus humide	0,3	0,87	2	0,77
BIO9 Température moyenne du trimestre le plus sec	0,1	0,85	3,5	0,85
BIO10 Température moyenne du trimestre le plus chaud	0,6	0,91	0,5	0,76
BIO11 Température moyenne du trimestre le plus froid	0	0,8	0	0,7
BIO12 Précipitations annuelles	1,5	0,95	0	0,71
BIO13 Précipitations de la période la plus humide	0,3	0,95	0,2	0,64
BIO14 Précipitations de la période la plus sèche	0,2	0,94	12,4	0,76
BIO15 Saisonnalité des précipitations (Coefficient de variation)	1,9	0,84	0,9	0,78
BIO16 Précipitations du trimestre le plus humide	1,1	0,95	0	0,63
BIO17 Précipitations du trimestre le plus sec	7,7	0,92	12,8	0,81
BIO18 Précipitations du trimestre le plus chaud	10	0,92	0,7	0,56
BIO19 Précipitations du trimestre le plus froid	66,1	0,95	4,4	0,79

Par l'analyse des niches climatiques des différentes espèces, deux graphiques (Figure 4.2) vont représenter les deux caractéristiques majeures en Algérie : le Tell et le Sahara. Le Tell forme une bande de plus de 100 km de large qui longe la côte méditerranéenne du Maroc, à l'ouest, jusqu'à la Tunisie, à l'est. Le Sahara est plus vaste, avec les nappes de dunes, de plaines et plateaux rocaillieux (Beniston, 1984). Les niches effectives des espèces du Tell ont des caractéristiques différentes de celles du Sahara. Leurs températures moyennes annuelles s'étendent de 14 à 18 °C et les précipitations annuelles de 400 à 1000 mm. D'autre part, ces caractéristiques s'étendent de 17 à 24 °C et de 20 à 200 mm, pour celles du Sahara. Ainsi, les espèces du Tell se limitent à des zones tempérées avec une pluviosité annuelle importante, tandis que les niches climatiques des espèces du Sahara se limitent aux environnements chauds et secs.

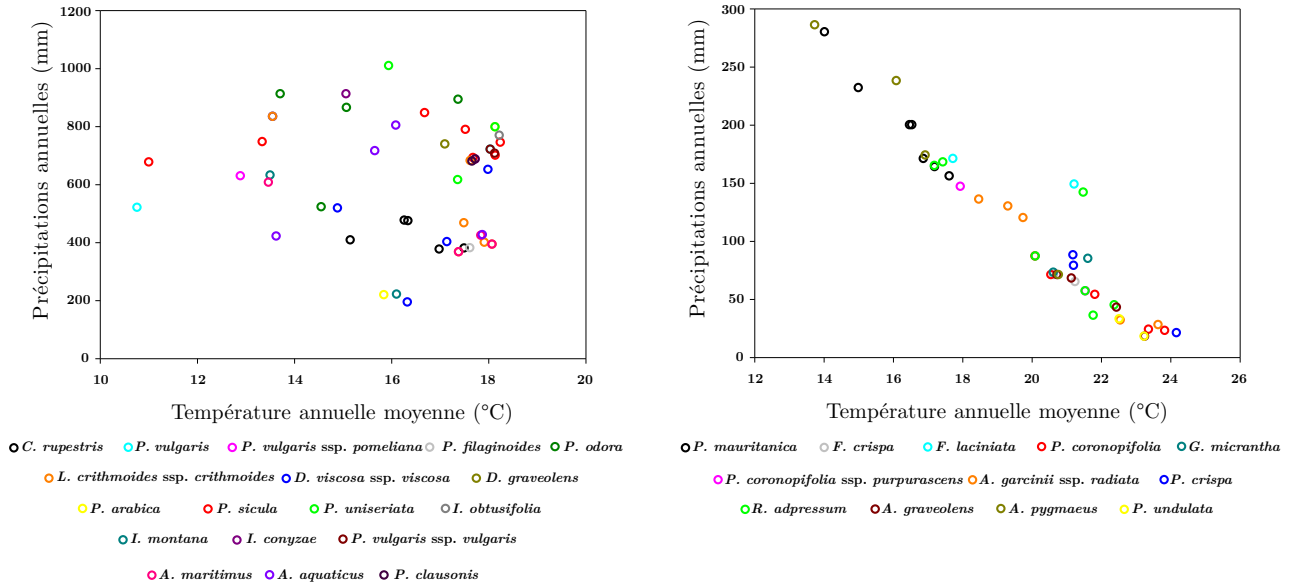


FIGURE 4.2 – Les niches bidimensionnelles des différentes espèces de la tribu des Inulées ; les espèces du Tell, à gauche et les espèces du Sahara, à droite.

Deux chaînes montagneuses traversent l'Algérie d'Ouest en Est, l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien. Par conséquent, la topographie de l'Algérie est composée de trois structures importantes ; Tell au nord de l'Atlas Tellien jusqu'à la côte, les Hauts plateaux, entre l'Atlas Tellien et l'Atlas saharien, et le Sahara, qui s'étend au sud de l'Atlas saharien représentant plus de 80% du pays. Le climat méditerranéen couvre le Tell, tandis que le climat désertique couvre le sud de l'Algérie (Despois et Raynal, 1975).

Il est clair que la compétition, la dispersion, la taille des niches et la distribution spatio-temporelle des conditions environnementales jouent un rôle dans la détermination de la répartition des espèces, par rapport à la distribution des habitats favorables. Pulliam (2000), a discuté le fait que, selon la théorie, les espèces peuvent être absentes dans un habitat favorable et présentes dans un habitat défavorable ; ce qui rend le concept de niche réelle beaucoup plus large que la niche fondamentale.

Les résultats ont montré que 12 espèces (*Pulicaria mauritanica* Coss., *Francoeuria crispa* (Forsk.) Cass., *Francoeuria laciniata* Coss. & Dur., *Perralderia coronopifolia* Coss., *Perralderia coronopifolia* ssp. *Purpurascens* (Coss.) Maire, *Gymnarhena micrantha* Desf., *Pulicaria crispa* (Forsk.) Benth. ex Oliv., *Rhanterium adpressum* (Desf.) Coss. & Dur., *Asteriscus graveolens* (Forssk.) Less., *Asteriscus pygmaeus* (DC.) Coss. & Dur., *Anvillea*

garcinii ssp. *Radiata* (Coss. & Dur.) A. Anderberg, *Pulicaria undulata* (L.) C.A.Mey.) appartiennent aux niches climatiques du Sahara alors que 18 espèces (*Chiliadenus rupestris* (Pomel) S. Brullo, *Pulicaria flaginoides* Pomel, *Pulicaria Arabica* (L.) Cass., *Dittrichia graveolens* (L.) W. Greuter, *Dittrichia viscosa* ssp. *Viscosa* (L.) Greuter, *Inula obtusifolia* A. Kerner, *Limbarda crithmoides* ssp. *Crithmoides* (L.) Dumort., *Asteriscus maritimus* (L.) Less., *Pulicaria vulgaris* ssp. *Vulgaris* (L.) Greuter, *Pulicaria clausonis* Pomel, *Pulicaria vulgaris* Gaertn., *Pulicaria vulgaris* ssp. *Pomeliana* (Faure & Maire) E. Gamal- Eldin, *Pulicaria odora* (L.) Rchb., *Pulicaria sicula* (L.) Moris, *Pulicaria uniseriata* N. Kilian, *Inula montana* Bal. & Bourg. ex Boiss., *Inula conyzae* (Griess.) DC., *Asteriscus aquaticus* (L.) Less.) appartiennent à la zone du Tell. Il a été trouvé que les deux genres *Asteriscus* (16 observations) et *Pulicaria* (37 observations) ont pu franchir la barrière entre le Tell et le Sahara et s'adapter aux différentes conditions climatiques.

4.1.2 Distribution sous l'influence des changements climatiques

Les résultats de la modélisation de la distribution des espèces de la tribu des Inulées dans les quatre scénarios RCP sont illustrés dans la figure 4.3. Il s'avère que les habitats de ces espèces seront très influencés par les changements climatiques, du fait que les espèces des zones arides et désertiques seront les plus affectées par ces changements et les espèces du Tell seront affectées à la fois par ces changements et le facteur anthropique. Les variables bioclimatiques qui ont des contributions élevées dans l'élaboration des modèles actuels et futurs sont représentés dans le tableau 4.2. La température moyenne annuelle est augmentée entre les modèles avec un taux de variation pouvant atteindre 20% contrairement aux précipitations annuelles où la diminution peut aller de 11 à 15%. Le coefficient de variation de la température (saisonnalité de la température), exprimé en pourcentage, montre une variabilité importante de la température dans les deux zones ; une remarque aussi notée pour la saisonnalité des précipitations qui représente un index en pourcentage de variation de ce paramètre. Par conséquent, ces changements font des espèces du Sahara les plus affectées puisqu'elles sont à faible ressources ; ce qui rend leurs environnements encore plus hostiles.

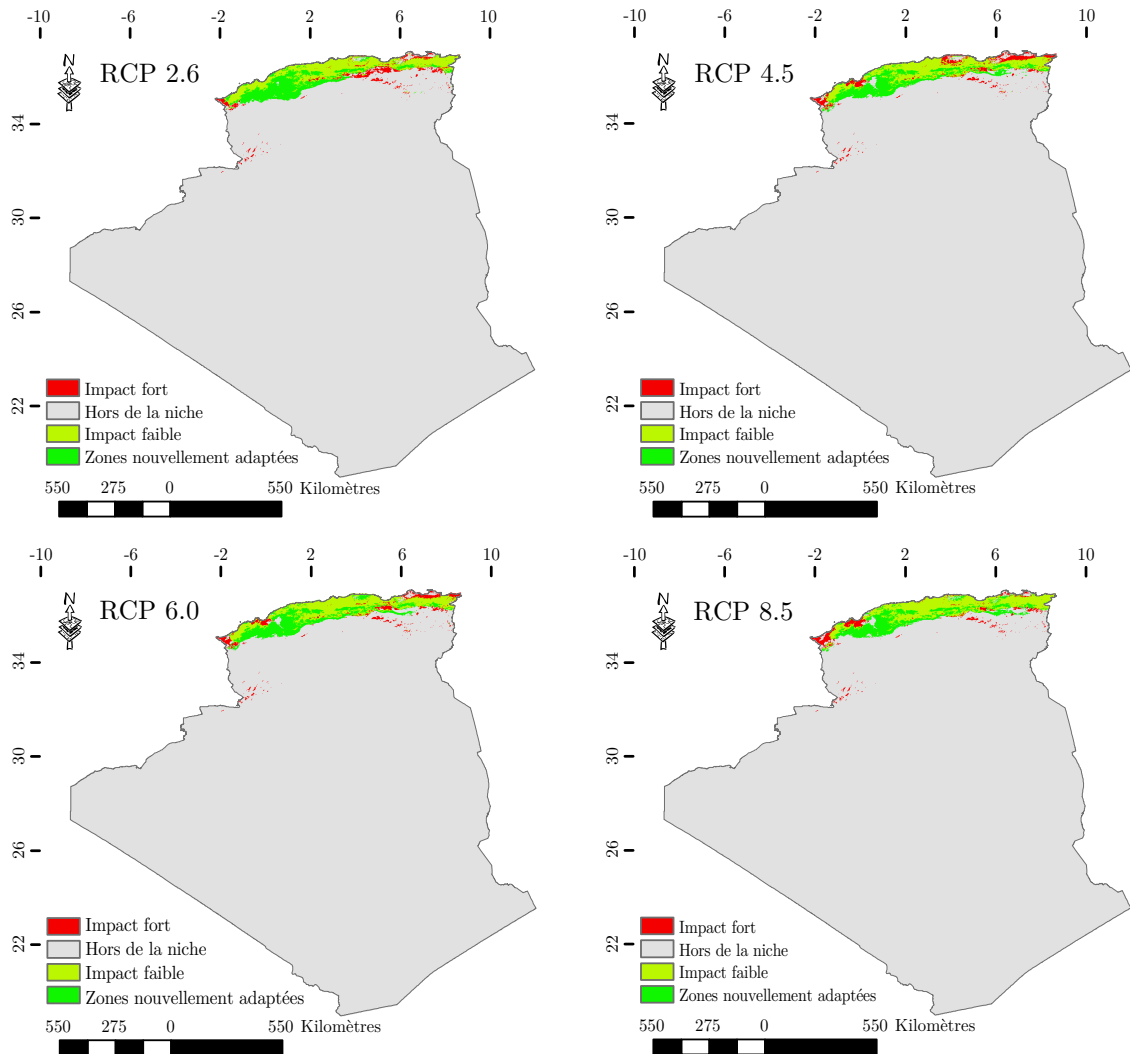


FIGURE 4.3 – Prédictions des futurs habitats favorables pour les espèces de la tribu des Inulées selon les scénarios climatiques RCP.

Pour les espèces du Tell, de vastes zones peuvent devenir de nouvelles zones de distribution potentielles (Tableau 4.2), mais ces zones ont diminué, en passant de 2.6 à 8.5. En revanche, les zones à faible impact ont augmenté entre ces deux scénarios, tandis que les altérations climatiques ont conduit à des variations des zones à fort impact, selon les quatre scénarios. Les zones à fort impact sur les espèces des Inulées vont s'agrandir selon RCP 4.5. Ce fait peut être interprété par l'augmentation de la saisonnalité des précipitations (65,3), la diminution des précipitations annuelles (611,2 mm) et l'augmentation de la température moyenne annuelle (18,5 °C). Selon RCP 8.5, l'augmentation de la saisonnalité des températures et la diminution des précipitations annuelles ont réduit les nouvelles zones de distribution potentielles et légèrement influencé les zones d'occurrence actuelle, par rapport aux autres scénarios.

TABLEAU 4.2 – Les variations des valeurs moyennes des changements prédits de six variables bioclimatiques influençant la distribution de la tribu des Inulées dans les modèles obtenus.

	Tell					Sahara				
	Présent	2.6	4.5	6.0	8.5	Présent	2.6	4.5	6.0	8.5
Zones										
Zones à fort impact (ha)	-	1114,7	1471,5	1185,4	1044,1	-	-	-	-	-
Zones à faible impact (ha)	-	4271,4	3914,6	4200,7	4342,1	-	-	-	-	-
Zones nouvellement adaptées (ha)	-	3227,5	3037,9	3144,9	3044,9	-	-	-	-	-
Facteurs										
Température moyenne annuelle (°C)	16,5	17,7	18,5	18,6	19,7	19,6	21,1	22,0	22,1	23,4
Écart diurne moyen de température	8,9	9,0	9,2	9,2	9,2	14,0	14,1	14,2	14,2	14,2
Saisonnalité de la température	581,1	585,1	593,1	592,9	616,8	810,8	802,4	826,9	822,1	849,8
Précipitations annuelles (mm)	717,7	691,3	611,2	635,8	606,9	122,2	121,3	113,1	114,1	108,4
Saisonnalité des précipitations	65,5	62,9	65,3	63,0	64,1	51,6	45,9	47,8	47,9	50,2
Précipitations du trimestre le plus sec (mm)	29,7	30,3	23,7	27,4	23,4	13,5	13,8	12,9	12,9	11,5

Face aux changements climatiques, les espèces des zones arides et sahariennes se montrent plus ou moins vulnérables vu la spécificité des habitats et les caractéristiques de l'histoire de leurs vies comme le temps de génération long, les capacités de dispersion limitées et la diversité génétique (Richardson *et al.*, 2012). Ces espèces seront donc devant l'enjeu de s'adapter rapidement pour survivre dans les nouvelles conditions. Les réponses des espèces à ces changements diffèrent les unes des autres et se manifestent par des mécanismes plastiques (plasticité phénologique) à travers un temps de vie individuel ou par des mécanismes génétiques tout en prenant des stratégies de changement sur trois axes : temporel, spatial et *in situ* (Bellard *et al.*, 2012).

En comparant les zones à fort impact, faible impact et nouvelle distribution potentielle avec les valeurs moyennes des facteurs bioclimatiques selon les quatre scénarios RCP, on peut remarquer que les changements climatiques entre le présent et RCP 2.6 peuvent être positifs pour l'expansion des espèces du Tell dans de nouveaux habitats. Cependant, à

mesure que la température continue d'augmenter et que les précipitations continuent de diminuer, les zones à faible impact s'agrandissent avec la restriction de nouvelles zones de distribution potentielles. Cette remarque a également été enregistrée par [Zhang et al. \(2018\)](#) pour la répartition de *Paeonia delavayi* et *Paeonia rockii* entre RCP 2.6 et RCP 8.5.

L'extension du Sahara avec des paramètres en permanente variabilité ([Scheiter et Higgins, 2009](#) ; [Thomas et Nigam, 2018](#)) et une température maximale de la période la plus chaude, pouvant dépasser 50°C, les habitats favorables des espèces de la tribu des Inulées seront rétrécis encore plus de la moitié ; ce qui rend de l'occurrence de ces espèces plus en plus faible et pousse des espèces menacées comme *Pulicaria filaginoides* vers une extinction rapide que prévu. Selon [Thuiller et al. \(2006\)](#), 47% des espèces végétales Namibiennes sont prévues vulnérables aux changements climatiques anthropogéniques si elles sont supposées incapable de migrer, sachant que ces changements en plus de la distribution vont altérer la phénologie car les plantes et leurs physiologies ne tolèrent pas trop la chaleur et sa variation ([Araújo et al., 2013](#)).

4.2 Distinction de la distribution de *R. adpressum*

Deux modèles de bonnes qualités ont été obtenus pour *R. adpressum* et *R. intermedium/suaveolens* avec des valeurs de surface incluse sous la courbe (AUC) de $0,98 \pm 0,006$ et $0,98 \pm 0,01$, respectivement. Les facteurs bioclimatiques qui ont une contribution majoritaire aux modèles de MaxEnt sont représentés dans le Tableau 4.3. Les précipitations dans le mois et le trimestre les plus secs sont des facteurs qui ont une grande contribution dans les modèles obtenus (27,8% au modèle de *R. adpressum* et 26,4% au modèle de *R. intermedium/suaveolens*). En plus, la saisonnalité de la température a contribué aussi majoritairement dans ces deux modèles (21,8% et 18,7%, respectivement), sachant que ce prédicteur mesure le changement de la température au cours de l'année. Entre les deux modèles, les facteurs dérivés de la température ont contribué à plus de 60% au modèle de *R. intermedium/suaveolens* contrairement au modèle de *R. adpressum* où les facteurs de précipitations ont contribué à 55%.

TABLEAU 4.3 – Pourcentages de contribution majeurs dans l’élaboration des deux modèles de prédiction de la convenance des habitats pour *R. adpressum* et *R. intermedium/suaveolens*.

<i>R. adpressum</i>	
Précipitations de la période la plus sèche	27,8 %
Saisonnalité de la température (Coefficient de variation)	21,8 %
Précipitations du trimestre le plus sec	10,5 %
Précipitations du trimestre le plus humide	9,9 %
Ecart annuel de température	7,9 %
Température moyenne du trimestre le plus chaud	5,8 %
<i>R. intermedium/suaveolens</i>	
Précipitations du trimestre le plus sec	26,4 %
Température moyenne du trimestre le plus sec	20,8 %
Saisonnalité de la température (Coefficient de variation)	18,7 %
Précipitations du trimestre le plus froid	5,7 %
Précipitations de la période la plus humide	5,1 %
Ecart diurne moyen de Température	4,6 %

La carte de distribution des espèces de *Rhanterium* en Algérie générée par les deux modèles de MaxEnt est représentée dans la figure 4.4. Ces espèces se répartissent au sud de l’Atlas Saharien et au nord du Sahara allant de Béchar à l’Ouest jusqu’à ElOued, à l’Est, avec une longueur atteignant 1100 km et une largeur d’environ 500 km. Le *R. adpressum* s’étend au sud du Maroc et en Mauritanie et sa distribution en Algérie commence de l’Ouest jusqu’au centre (4°E, 32-33°N) alors que la distribution de *R. suaveolens* commence juste après (5°E, 31-35°N) jusqu’en Tunisie et en Libye. Entre ces deux zones (entre les lignes rouges dans la figure 4.4) s’étend l’espèce hybride *R. intermedium* entre 3-4°E et 29-34°N.

Des réponses de l’espèces *R. adpressum* aux 20 facteurs environnementaux après 10 réplifications de validation croisée dont huit sont représentées dans la figure 4.5. Ces réponses montrent les préférences de ces espèces pour chaque facteur ainsi que les valeurs avec leur déviation standard ont été données dans la table 4.4. Pour les deux facteurs, la température moyenne annuelle et celle du trimestre le plus sec, l’intervalle de réponse de *R. adpressum* est plus large que les deux espèces *R. intermedium/suaveolens*, avec une probabilité de

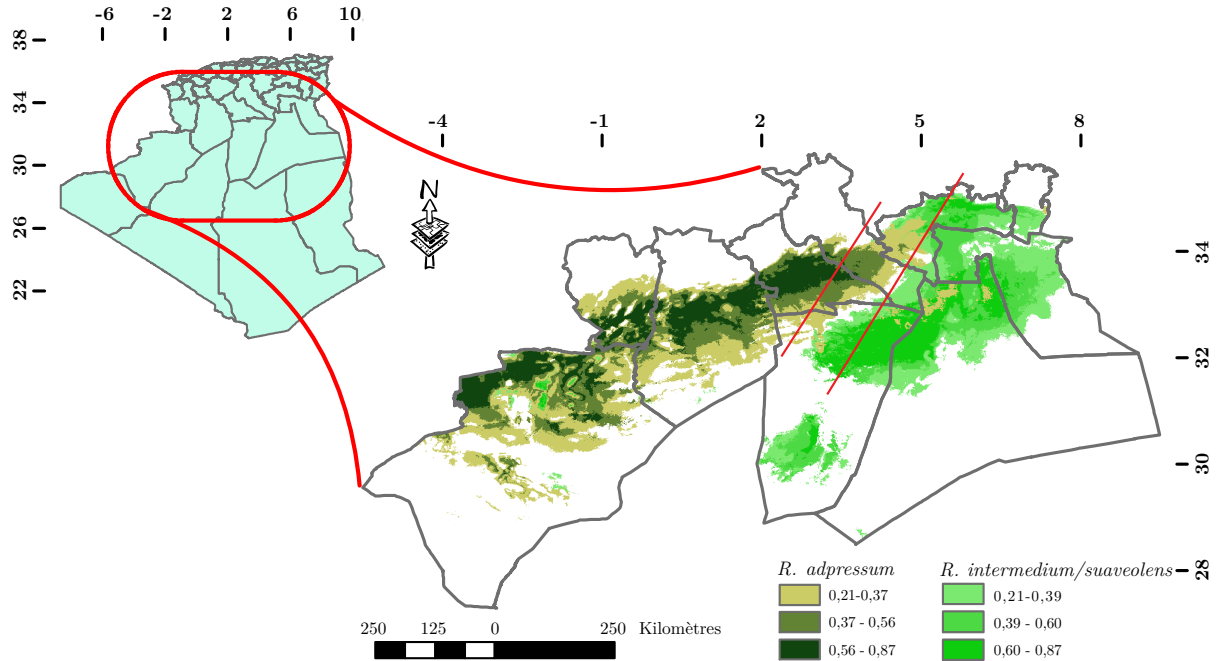


FIGURE 4.4 – Modèles de distribution des espèces *R. adpressum* et *R. intermedium/suaveolens* en Algérie.

présence $\leq 0,65$, contrairement au facteur des précipitations annuelles où les zones de répartition de *R. adpressum* sont moins pluvieuses que celles des deux autres espèces. Malgré les différences entre les facteurs climatiques pour les deux zones, le facteur d'élévation montre des réponses distinctives entre ces espèces où le *R. adpressum* à l'Ouest préfère des altitudes élevées contrairement au *R. intermedium/suaveolens* qui préfèrent les altitudes basses.

En général, les habitats de *R. adpressum* peuvent être caractérisés par une élévation moyenne de 888,74 m (DS=94,89 m) avec une température moyenne annuelle 18,65 °C (DS=1,19 °C) et précipitations annuelles de 140,72 mm (DS=25,26 mm), alors que les habitats des espèces *R. intermedium/suaveolens* sont caractérisés par une élévation moyenne de 255,18 m (DS=114,52 m), avec une température moyenne annuelle de 21,61 °C (DS=0,44 °C) et des précipitations annuelles de 86,62 mm (DS=19,75 mm).

Les résultats montrent deux zones de distribution distinctes. La première pour *R. adpressum* au Nord-Ouest de l'Algérie, la deuxième dans le Nord-Est pour *R. suaveolens* et entre les deux, dans la zone de rencontre, se trouve l'espèce hybride *R. intermedium* qui a été caractérisée par une grande variabilité morphologique par rapport aux deux espèces

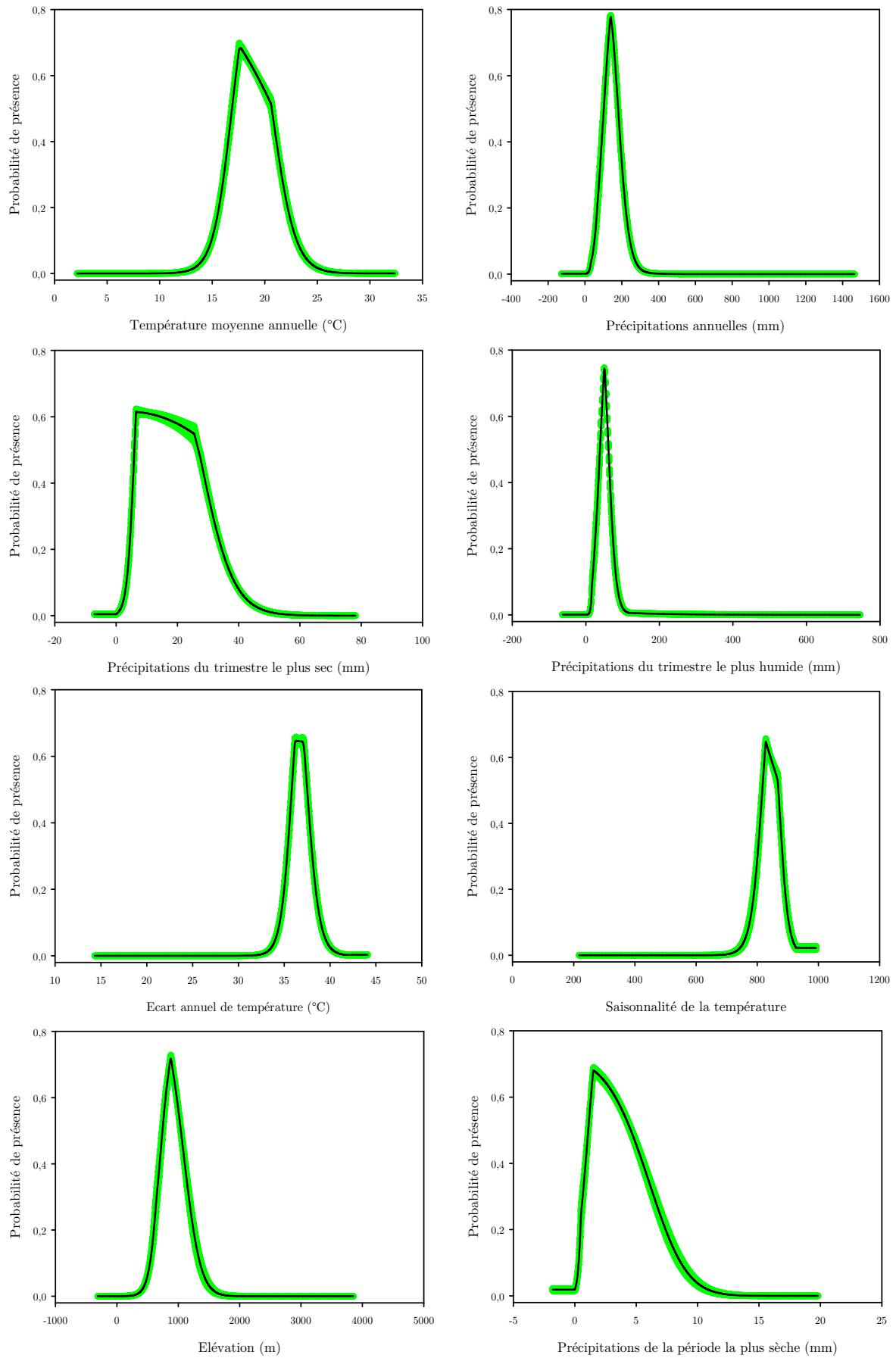


FIGURE 4.5 – Les courbes de réponses de *R. adpressum* à huit prédicteurs environnementaux.

TABLEAU 4.4 – Les valeurs moyennes des variables bioclimatiques caractérisant la préférence d’habitat pour les espèces *R. adpressum* et *R. intermedium/suaveolens* avec leurs déviations standards.

Variable	<i>R. adpressum</i>	<i>R. intermedium / suaveolens</i>
Température moyenne annuelle (°C)	18,65 ± 1,19	21,61 ± 0,44
Ecart diurne moyen de la température (°C)	13,34 ± 0,26	13,03 ± 0,48
Isothermalité (%)	35,80 ± 0,92	34,53 ± 1,34
Saisonnalité de la température (%)	841,05 ± 16,31	860,40 ± 12,28
Température maximale de la période la plus chaude (°C)	36,36 ± 1,18	39,91 ± 1,06
Température minimale de la période la plus froide (°C)	-0,08 ± 1,02	2,91 ± 0,38
Ecart annuel de température (°C)	36,76 ± 0,54	36,73 ± 0,73
Température moyenne du trimestre le plus humide (°C)	16,89 ± 1,46	12,44 ± 0,49
Température moyenne du trimestre le plus sec (°C)	29,08 ± 0,88	32,65 ± 0,37
Température moyenne du trimestre le plus chaud (°C)	28,95 ± 0,99	32,50 ± 0,48
Température moyenne du trimestre le plus froid (°C)	8,35 ± 0,88	11,34 ± 0,32
Précipitations annuelles (mm)	140,72 ± 25,26	86,62 ± 19,75
Précipitations de la période la plus humide (mm)	18,27 ± 3,01	11,42 ± 2,15
Précipitations de la période la plus sèche (mm)	2,89 ± 1,08	1,63 ± 0,75
Saisonnalité des précipitations (%)	34,70 ± 6,38	43,83 ± 2,28
Précipitations du trimestre le plus humide (mm)	49,02 ± 7,70	26,38 ± 4,89
Précipitations du trimestre le plus sec (mm)	16,58 ± 6,27	6,70 ± 1,94
Précipitations du trimestre le plus chaud (mm)	16,97 ± 6,74	5,05 ± 1,36
Précipitations du trimestre le plus froid (mm)	38,78 ± 7,74	21,69 ± 4,45
Élévation (m)	888,74 ± 94,89	255,18 ± 114,52

typiques *R. adpressum* et *R. suaveolens*. Wiklund (1986), a détaillé les descriptions comparatives de ces trois espèces en se basant sur des spécimens, conservés dans le Museum National d’Histoire Naturelle de France, et a proposé une carte de distribution semblable aux modèles obtenus par MaxEnt (figure 4.4). Au sein de l’espèce hybride, elle a observé des spécimens, d’après ses mesures, intermédiaires ou proches à l’une des deux autres espèces. Elle a aussi exposé le fait qu’une variation similaire peut apparaître sans hybridation dans les zones subissant un grand changement écologiques qui ressemble par conséquent à de zones d’intergradation.

Les deux espèces *R. adpressum* et *R. suaveolens* se distribuent dans des régions classées comme des pelouses et fruticées du semi-désert sub-méditerranéen et rarement dans des régions désertiques. Par l'indice d'aridité (IA) ces zones peuvent être arides pour *R. adpressum* ($IA=0,10\pm0,05$) et hyperarides pour *R. suaveolens* ($IA=0,05\pm0,03$). D'après nos résultats, il semble que les deux zones ont des caractéristiques climatiques différentes, en plus du facteur d'altitude qui est significativement différent. Selon Wiklund (1986), le chevauchement remarqué entre ces deux zones (ligne rouge dans la figure 4.4) représente une séparation complète en cours, mettant les espèces de *R. adpressum* et *R. suaveolens* sous un modèle de spéciation allopatrique.

R. adpressum est généralement reconnu par ces grands capitules multifleurs et les involucre subglobuleux avec des bractées appliquées. C'est une plante appréciée par les dromadaires et utilisée par les populations locales dans la production du fromage et comme un bois de chauffage. *R. suaveolens* est reconnu par son odeur forte et par les bractées involucrelles étroites, pointues et, à maturité, révolutes. Les caractères généraux de *R. intermedium* sont les capitules moyens ou petits, degré de flexion des bractées de l'involucre, vers l'extérieur, d'un angle de 45° et une longueur de lame de feuilles moyenne (Gauthier-Pilters, 1961 ; Wiklund, 1986).

Deux mécanismes avec lesquelles le climat peut conduire à une spéciation, à savoir la divergence et le conservatisme de la niche. Dans le premier, plusieurs populations occupent différents habitats et les différences dans les conditions climatiques vont imposer une divergence au fil du temps. Dans le deuxième, les différences dans le climat dans un espace peuvent être, pour des populations allopatriques, une barrière de dispersion et les espèces naissantes s'adaptent et tolèrent les nouvelles conditions (Wiens, 2004). Le conservatisme de la niche peut être un aspect important de spéciation, surtout sous le changement climatique à long terme (Hua et Wiens, 2013).

La relation entre l'élévation ou le gradient altitudinal et la spéciation a été largement discuté (Steinbauer *et al.*, 2016, 2017). En plus les zones larges augmentent, aussi, les probabilités de spéciation et la divergence allopatrique (Losos et Schluter, 2000). Les facteurs écologiques intrinsèques dans cette étude sont des variables limitants les zones de distribution des espèces *R. adpressum* et *R. suaveolens*. Cependant, il est important de

signaler l'impact d'autres facteurs abiotiques et biotiques comme les propriétés des sols, la compétition et la tolérance au froid (Wiens, 2004 ; Aguilée *et al.*, 2018).

4.3 Propriétés physico-chimiques du sol

Les moyennes des paramètres physico-chimiques de neuf échantillons du sol, des trois sites étudiés sont représentées dans la figure 4.6. Le sable domine la composition physique de tous les échantillons (77-96%) ; avec des pourcentages de limon (3-24%) et d'argile (0.3-8%). Un aspect calcaire s'est avéré caractéristique pour ces échantillons, avec des pourcentages variant entre 35 et 45%, le CaCO_3 a tamponné le pH du sol aux alentours de 8,2 et 8,7. Dans ce type de sols le pH ne peut pas être modifié. L'alcalinité, par conséquent, diminue la perméabilité du sol et les plantes en générale sont face aux restrictions d'absorption des nutriments (Delgado et Gómez, 2016 ; Jafari *et al.*, 2018). La stoechiométrie du sol du rapport CaCO_3/P disponible dans les zones arides et semi arides influence significativement la croissance et la densité végétale. Cette relation inversement proportionnelle dans quatre communautés d'*Artemisia ordosica* a fait l'objectif de l'étude de Zhao *et al.* (2012).

L'alcalinité remarquée dans les échantillons est interprétée par la sodicité représentée par une conductivité électrique (CE) entre 0,2 et 1,8 dS/m à 20 °C. Dans cet intervalle de conductivité, les concentrations totales des sels ne sont pas élevées mais le pourcentage du sodium échangeable (PSE) peut atteindre des niveaux nocifs pour les plantes (Jafari *et al.*, 2018). La chimie de ces sols sera aussi influencées par les teneurs de CaCO_3 , K^+ , P, NO_3^- et N. Ces minéraux sont des éléments cruciaux pour le développement des plantes. Ils peuvent constituer, entre autres, 5-10% de la biomasse. Les plantes, de leur part, jouent un rôle important dans la redistribution, la transformation et le mouvement chimiques de la lumière, l'atmosphère et le sol, du fait qu'elles peuvent changer leurs environnements locaux (sol), surtout dans les milieux arides. C'est un caractère des arbustes de désert et des écosystèmes steppiques menant au concept des « îles de fertilité » (Jobbágy et Jackson, 2004 ; Waring *et al.*, 2015 ; Schlesinger *et al.*, 1996).

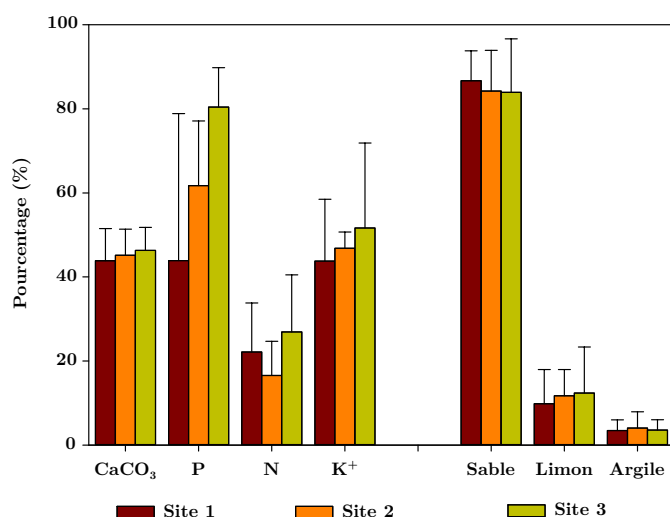


FIGURE 4.6 – Pourcentages des composants chimiques et physiques des échantillons du sol analysés.

4.4 Composition chimique des huiles essentielles de *R. adpressum*

Les analyses chromatographiques de 15 échantillons d'huiles essentielles de *R. adpressum* (tableau 4.5), collectés en 5 mois et de trois sites, ont permis de montrer les variabilités de la composition chimique des familles de terpénoïdes (figure 4.7). La dominance de la famille des hydrocarbures monoterpéniques (77-90%) dans cette composition est caractérisée par des composés avec des pourcentages plus ou moins élevés selon le mois et le site ; l' α -Pinène (9-26,6%), le β -Pinène (7-22%), l' α -Terpinène (0,6-9%) et le Limonène (1,1-15,9%). Les monoterpènes oxygénés (4,5-9,2%), les sésquiterpènes hydrocarbures (1,6-9,9%) et les sésquiterpènes oxygénés (4.3-7.2%) sont des terpénoïdes faiblement synthétisés par la plante durant cette période de l'année. Le nombre de composants dans ces huiles est aussi variable et la CPG a révélé un nombre élevé de composants dans le mois de Mars pour tous les site de récolte et faible au début du cycle végétatif, au mois de Novembre.

TABLEAU 4.5 – Composition chimique des huiles essentielles du *Rhanterium adpressum* récolté de trois sites pendant cinq mois.

Composés ^a	Site 1				Site 2				Site 3				IR ^b			
	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Nov	Déc		Jan	Fév	Mar
α -Thuyène	-	12,36	0,20	0,24	12,8	0,32	19,0	10,5	8,23	6,66	0,52	0,53	0,40	0,21	7,53	929
α -Pinène	3,21	16,7	15,2	31,3	21,3	11,2	23,7	65,5	36,5	32,7	15,3	17,0	20,1	14,5	24,4	943
Camphène	21,0	-	11,2	9,45	-	18,7	-	2,36	-	-	2,34	16,6	1,69	7,35	-	947
β -Pinène	25,6	24,7	14,4	13,3	19,3	17,3	25,3	-	14,0	11,1	22,7	20,5	26,7	15,6	13,3	976
3-Octanol	0,26	25,0	29,2	-	15,3	24,1	-	-	-	-	22,5	17,0	16,0	25,1	12,5	1001
α -phellandrène	-	9,18	0,16	14,9	2,44	0,24	0,18	-	18,7	16,9	0,24	-	-	3,27	-	1007
α -Terpinène	0,60	-	-	1,76	0,61	0,62	0,73	4,74	0,45	1,48	1,20	0,07	0,65	0,27	0,24	1014
<i>p</i> -Cymène	10,6	0,01	0,21	0,32	0,60	0,35	-	0,43	-	0,44	0,62	0,05	-	2,17	-	1024
1,8-Cinéol	-	0,23	7,84	10,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1036
Limonène	0,24	1,17	-	0,71	5,82	10,1	15,9	1,23	5,52	4,26	10,6	11,5	17,3	8,62	4,94	1029
γ -Terpinène	0,20	0,74	0,60	0,23	1,05	1,14	0,28	-	0,84	0,43	2,15	0,24	1,12	0,50	0,46	1057
Terpinolène	-	-	-	-	-	1,33	0,33	-	0,84	1,34	-	1,02	0,36	1,64	0,95	1088
Linalool	0,64	0,52	-	1,05	0,45	0,86	0,16	0,30	0,40	0,47	1,99	1,52	0,70	0,56	0,51	1105
Terpinèn-4-ol	1,29	0,59	-	-	-	1,92	2,14	-	1,26	-	3,93	1,85	1,94	-	-	1178
α -Terpinéol	0,94	1,42	1,61	0,74	1,80	0,82	0,45	0,87	-	0,35	1,43	0,72	0,69	0,61	0,28	1191
Germacrène D	2,07	0,01	4,44	1,30	2,70	1,84	0,30	-	-	4,32	2,01	1,43	0,88	4,09	5,65	1481
γ -Cadinène	0,64	-	0,60	-	0,60	0,39	-	-	-	-	0,49	-	-	-	-	1516
Nérolidol, (E)	0,62	-	0,75	-	-	-	0,55	-	-	-	-	0,04	0,94	0,48	0,54	1560
Léolol	-	-	0,23	0,10	0,50	-	0,16	-	0,99	0,58	-	0,02	0,55	1,14	1,41	1566
Spathuléol	0,21	-	0,47	1,01	0,39	0,26	0,07	-	0,45	0,13	0,42	0,56	0,40	0,45	0,58	1575
α -Muurolo	-	-	-	0,88	1,53	0,83	0,37	-	1,91	2,08	-	-	-	-	-	1626
β -Eudesmol	0,70	-	0,70	0,51	0,86	0,50	0,16	-	0,45	4,19	1,49	1,59	3,13	1,73	2,74	1640
α -Eudesmol	-	-	0,13	1,39	1,32	0,36	0,01	-	3,47	1,41	0,60	0,65	0,14	0,67	1,72	1647
α -Cadinol	-	-	-	0,63	0,74	-	-	0,35	-	0,25	-	-	-	-	-	1644
β -Bisabolol	-	-	1,44	1,49	1,62	0,31	1,20	-	-	0,32	0,70	0,40	0,56	0,47	0,81	1675
Total identifié	70,0	92,6	89,3	92,1	91,7	93,7	92,3	86,3	94,0	89,3	91,4	93,3	94,2	89,5	78,5	

^a Les composés sont répertoriés dans l'ordre de leur élution dans une phase stationnaire (apolaire) de diméthylsilicone avec 5% de groupes phényle.^b Les Indices de Rétention sur la colonne DB-5.

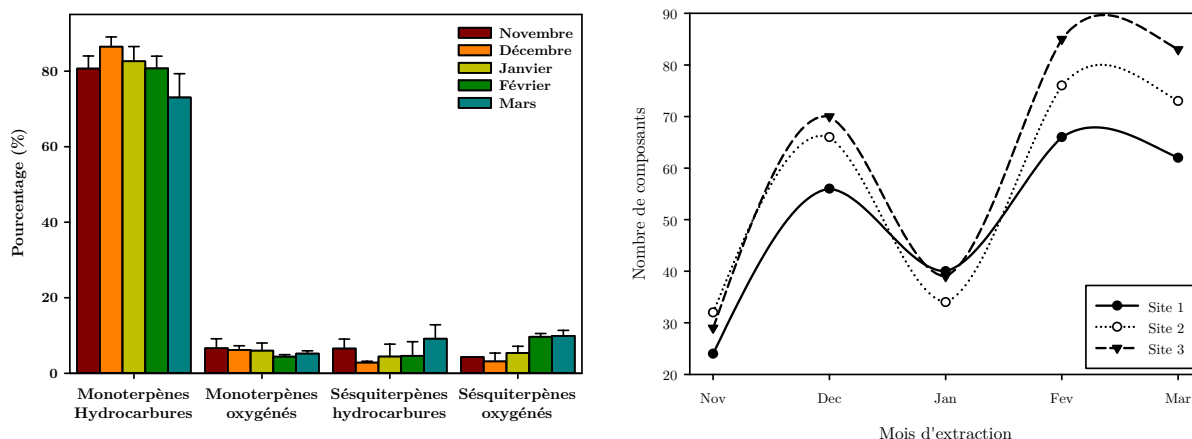


FIGURE 4.7 – La variation de la composition chimique de l’huile essentielle de *R. adpressum*, à gauche : Les moyennes de la composition chimiques en familles de terpénoides, à droite : l’évolution du nombre de composants dans les huiles selon le mois d’extraction et le site de récolte.

Dans une étude précédente, il a été remarqué dans la composition en familles de terpénoides des huiles essentielles de *R. adpressum* extraites durant trois mois (avril, mai et juin) représentant la phase terminale du cycle végétatif, une diminution du pourcentage des monoterpènes hydrocarbures et une légère augmentation de celui des monoterpènes oxygénés ; avec une variabilité non significative de taux des sésquiterpènes totaux. Cette remarque a été notée pour les deux parties feuilles et fleurs (Elhouiti *et al.*, 2017). Il a été constaté que, suivant le cycle phénologique de *R. adpressum*, la composition chimique totale des huiles essentielles est caractérisée, principalement, par les hydrocarbures monoterpéniques mais avec des variations temporelles et spatiales remarquables de la composition élémentaire (Elhouiti *et al.*, 2016, 2017).

Les études ont prouvé la variation de la teneur, la qualité et la composition des huiles essentielles avec la progression de la phénologie des plantes (Mirjalili *et al.*, 2006 ; Chauhan *et al.*, 2013). Dans le même stade phénologique, ces caractéristiques varient aussi selon l’altitude et les facteurs du microclimat (Alimohammadi *et al.*, 2017 ; Lago *et al.*, 2006). Cette variabilité peut être la conséquence de l’ensemble de ces influences mais elle résulte, aussi, de mécanismes de régulation de la production des terpénoides en réponse aux différents stresses, attaques des herbivores et aux changements physiques de l’habitat (Mann, 1987).

4.4.1 Analyse chimiométrique

Les chromatogrammes obtenus par CG-DIF sont représentés par 16 à 41 pics, selon le site et le mois d'extraction. Les flèches sur la partie zoomée dans la figure 4.8 montrent des pics similaires dans tous les échantillons pour les familles monoterpéniques ; à savoir : α -Pinène (7,4 min), Camphène (7,9 min), β -Pinène (9,1 min), Octanal (10 min), Limonène (12 min), β -Ocimène (13,9 min) et Terpinolène (16 min) (Babushok *et al.*, 2011).

Pour réduire la complexité de ces données chromatographiques et fournir une représentation graphique des relations entre les échantillons, l'ACP des chromatogrammes alignés est montrée dans la figure 4.9. Deux composantes principales, représentant 60,6% de la variance totale, montrent que ces profils varient entre les trois sites. La distinction des groupes à l'intérieur de ces échantillons par leurs profils chromatographiques n'a pas été possible dans l'espace de ces deux composants puisque les trois sites se trouvent dans un cercle de rayon de 10,6 km seulement. D'autre part, la classification hiérarchique ascendante de ces profils, avec la méthode de Ward, révèle que les échantillons du premier site peuvent former une classe distincte des deux autres sites, avec une dissimilitude de 63% entre les classes.

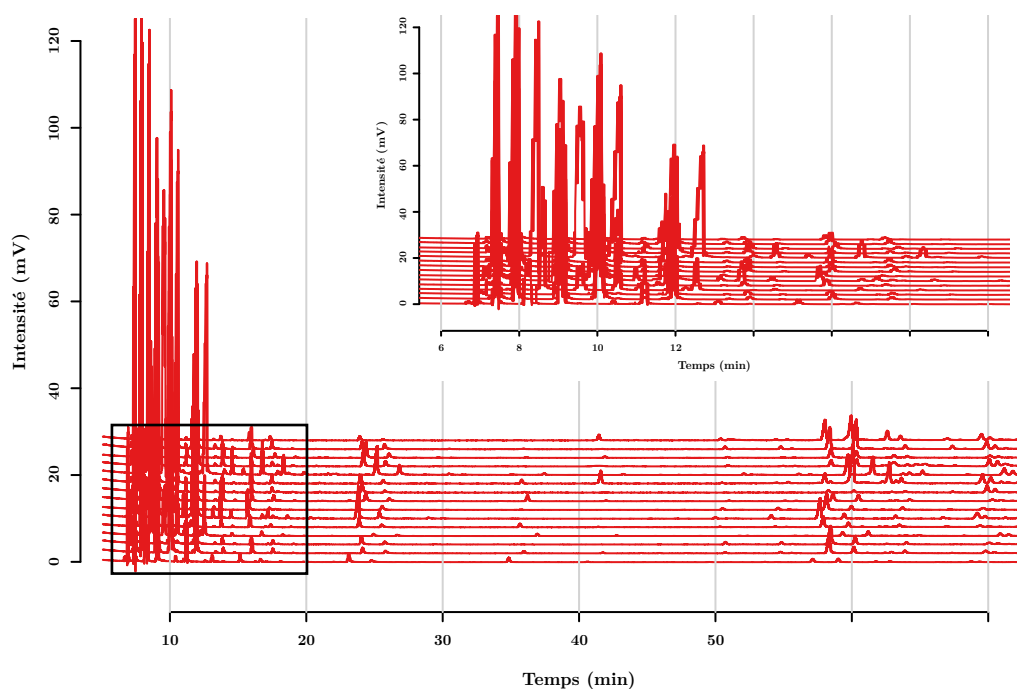


FIGURE 4.8 – Les profils chromatographiques de CG-DIF de 15 échantillons des HE de *R. adpressum*, alignés par 0,10 min avec le package ChemoSpec de R.

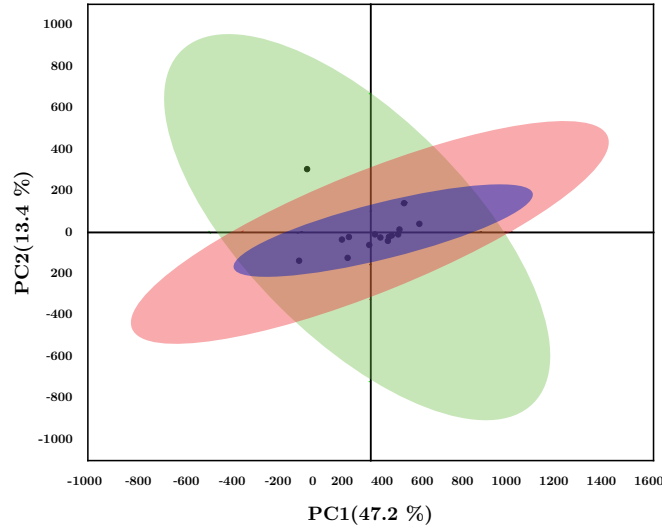


FIGURE 4.9 – Représentation des scores de l’ACP des profils chromatographiques des échantillons des trois sites illustrées par des ellipses.

Une analyse de ces 15 échantillons de l’HE de *R. adpressum* avec la spectrophotométrie UV-Vis ($\lambda = 285-410$ nm) révèle une variabilité de la composition chimique en fonction des mois d’extraction (figure 4.10). Par l’ACP qui explique 93% de la variance totale, le mois d’échantillonnage avec l’ensemble de ses facteurs bioclimatiques semble influencer cette composition tout au long du développement phénologique. Cette variabilité a été aussi remarquée dans les tendances des valeurs des absorbances avec la représentation de l’effet par nuage de points qui utilise les absorbances, selon les mois et la région, en fonction de la moyenne de toutes les absorbances enregistrées.

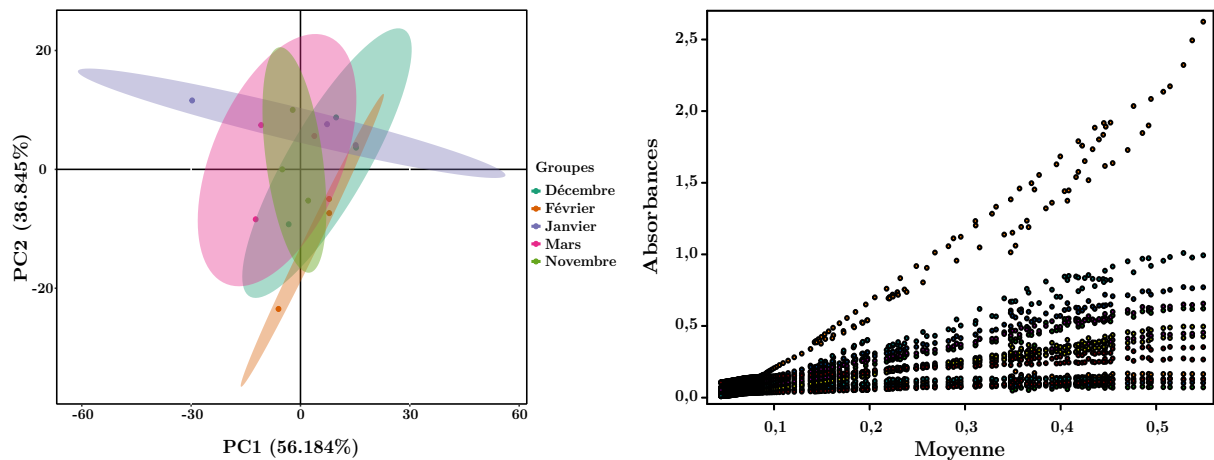


FIGURE 4.10 – Analyse statistique des données spectrophotométriques UV-Vis des 15 échantillons de l’HE de *R. adpressum*, à gauche : les scores de l’ACP distingués avec des ellipses selon le mois d’échantillonnage, à droite : représentation de l’effet par nuage de points des absorbances mesurées.

4.4.2 Relation entre la composition chimique des huiles essentielles et les propriétés du sol

Les problèmes de salinité et de sodicité sont très répandus dans les zones arides et semi arides. En effet, les sols halomorphes ont été identifiés comme salins, alcalins, sodiques, salins-alcalins ou sodiques-salins caractérisant les terres steppiques et désertiques (Dagar, 2005). La sodicité, comme la salinité, exerce des pressions chimiques en affectant la germination des graines, la croissance végétative et le fonctionnement osmotique (Singh *et al.*, 2015).

Dans cette étude, l'analyse statistique du plan factoriel a permis de révéler des relations significativement positives ($\alpha=0,05$) de CE, P et leur association avec la variation de monoterpènes (Coeffs : 357 ; 384,9 et 408,3) et sésquiterpènes (coeffs : 86,5 ; 84,25 ; 92,05) hydrocarbures (annexe D.1). En revanche, une interaction significativement négative entre ces variables et les monoterpènes (-150,4 ; -153,9 et -165,5) et les sésquiterpènes (-293,0 ; -315,2 et -334,7) oxygénés a été révélée. Dans la figure 4.11, le diagramme de Pareto montre les valeurs et l'importance des effets des variables de la composition du sol sur la variation de la composition en familles de terpénoïdes des HE de *R. adpressum*. A un seuil de signification statistique $\alpha=0,05$, les barres pour les facteurs qui coupent la ligne de référence en rouge ont des effets statistiquement significatifs sur ces familles.

Les nutriments minéraux et leurs effets sur le rendement et la composition des huiles essentielles ont été investigués par plusieurs études. Prasad *et al.* (2006) ont rapporté, par leurs expériences sur l'influence de la sodicité sur la croissance et le rendement en huile essentielle de Geranium, qu'ils augmentent avec l'augmentation de PSE jusqu'à 16 et 7%, respectivement ; et au-delà, une diminution significative a été remarquée.

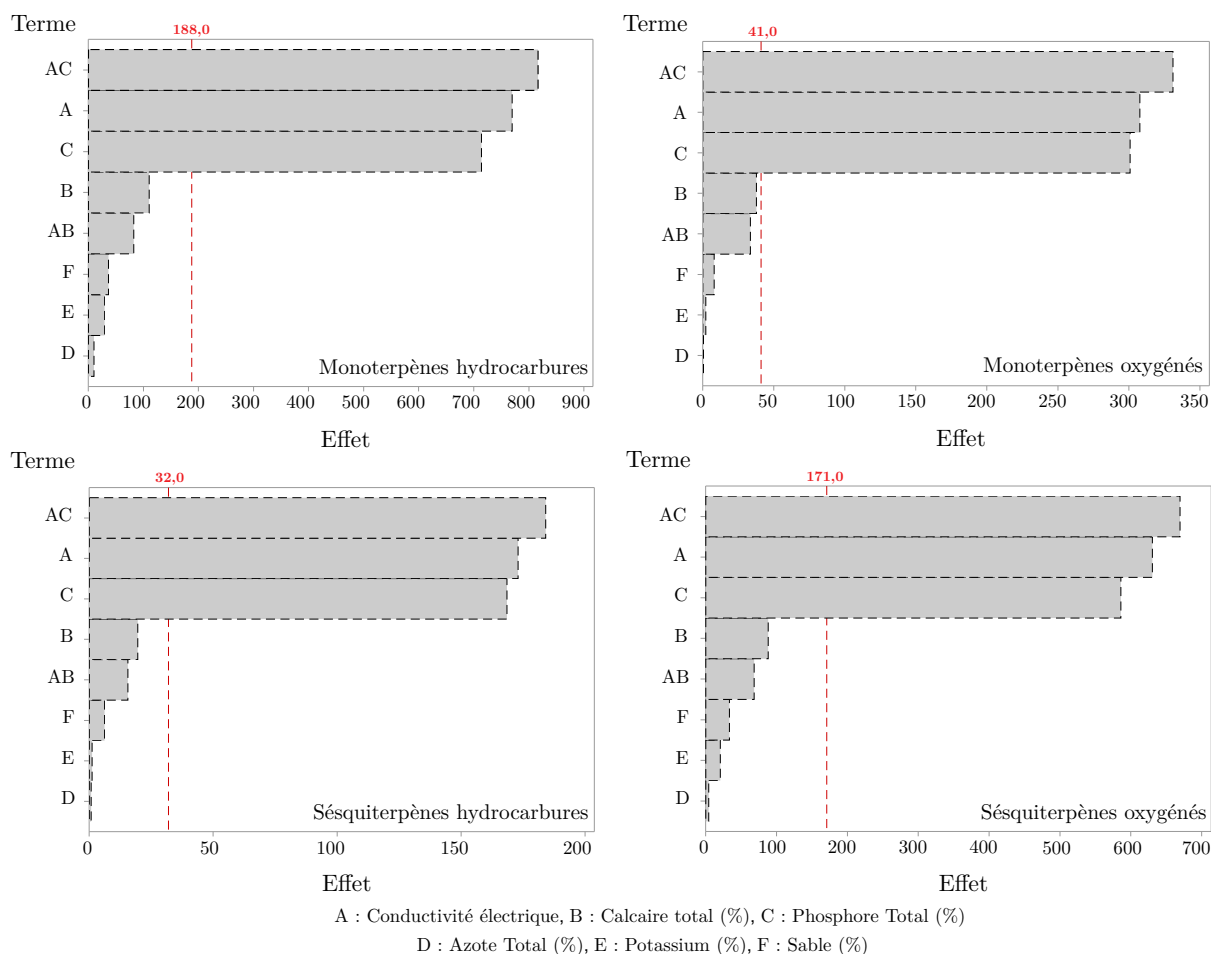


FIGURE 4.11 – Diagramme de Pareto des effets des variables de la composition du sol sur la variation des monoterpènes et sésquiterpènes hydrocarbures ou oxygénés.

Dans une autre étude, les concentrations de PSE affectent remarquablement la croissance d'*Ocimum sanctum* et le contenu en cations à tous les niveaux testés 15,7, 35,6 et 54,6 (Singh *et al.*, 2015). L'ajout du phosphore augmente le contenu en cations, les caractéristiques végétales de *Lavandula × intermedia* et la teneur en huile essentielle à un seuil tolérable de 100 kg ha⁻¹ (Erbaş *et al.*, 2017). L'effet des doses de N, P et K sur la croissance et le rendement en huile essentielle de *Mentha longifolia*, *Ocimum basilicum* et *Matricaria chamomilla* a mis en évidence des réponses plus ou moins tolérables des plantes envers ces changements (Alsafar et Al-Hassan, 2009 ; Sharafzadeh *et al.*, 2011 ; Emongor *et al.*, 1990).

Les effets-réponses de ces facteurs environnementaux sur les plantes étudiées aide à expliquer les interactions régissant le cycle phénologique mais ça reste toujours dans des perspectives agricoles. A l'état sauvage, les réponses des plantes dans leurs niches diffèrent de l'aspect « inductif » par l'aspect « adaptatif », du fait que la morphologie et la chimie de

ces plantes sont caractéristiques dans un biotope donné. Dans des climats arides, les plantes utilisent des composés volatiles ; souvent les monoterpènes (Mann, 1987). Cette réponse due au comportement adaptatif car pour les plantes limitées en nitrogène par exemple, le coût métabolique pour produire les alcaloïdes est très cher comparé à la production des terpénoïdes (Feeny, 1976). Ces terpénoïdes peuvent jouer des rôles importants dans la communication, dans l'attraction et, par leur mobilité et diffusion dans l'air et dans le sol, dans la défense (Yazaki *et al.*, 2017).

4.5 Variation chimique intra-spécifique des huiles essentielles de *R. adpressum*

4.5.1 Extraction de l'huile essentielle et analyse de la composition chimique

L'extraction des huiles essentielles de *R. adpressum* a été faite à partir des masses de feuilles entre 10 et 50 g permettant l'obtention des volumes suffisants pour l'analyse chromatographique. Les teneurs obtenues exprimées en ml/kg ont été tracées dans la figure 4.12. Malgré la faible masse (19 à 32 g) des échantillons 1 à 4, le rendement a été important. Ceci peut être dû à l'influence herbivore et dû au fait que ces échantillons ont été récoltés d'une zone de pâturage dans laquelle les dromadaires les ont fortement broutés. Les pieds de *R. adpressum* dans cette zone sont morphologiquement différents, caractérisés par les tiges courtes (10 à 20 cm) larges et robustes avec des feuilles larges et épineuses. Le rendement des échantillons récoltés de Laghouat était important de moyenne de 11,6 ml/kg (annexe E.1). Ici les pieds sont des larges touffes, très ramifiées, avec des feuilles moins larges et moins épineuses.

Ces teneurs sont plus élevées que celles obtenues dans d'autres études. Elles étaient entre 1,5 et 5,75 ml/kg pour les échantillons de *R. adpressum* collectés de différentes régions de l'Algérie (Elhouiti, 2009). La teneur était aussi faible dans le cas des huiles essentielles de *R. suaveolens* (4 ml/kg) (Chemsas *et al.*, 2016) et de *R. epapposum* selon la partie d'extraction ; feuilles (1 ml/kg), fleurs (5 ml/kg) ou tiges (0,001 ml/kg) (Awad et Abdelwahab, 2016). Cette différence remarquable peut être due à plusieurs facteurs tels que le stade phénologique, la période de récolte, la saison et la région.

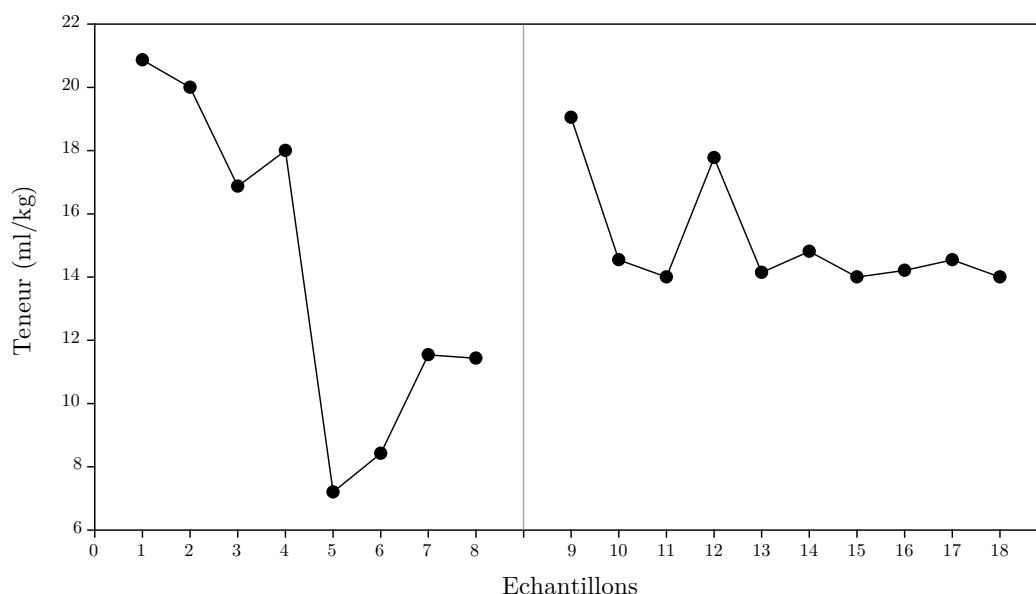


FIGURE 4.12 – Les teneurs en huile essentielles de *R. adpressum* obtenues après une hydrodistillation de 4 h. à gauche : les échantillons de Béchar et Naama, à droite : les échantillons de Laghouat.

L'analyse chromatographique a permis d'identifier 42 composés représentant 54 à 98% de la composition chimique totale (tableau 4.6). La famille des hydrocarbures monoterpéniques est la famille dominante dans la composition de toutes les huiles (22-69%). Elle est représentée par des composés majoritaires comme le β -Pinène (6,3-23,1%), le β -Myrcène (5,7-26,5%), l' α -Pinène (1,6-11,7%), le *p*-Cymène (3,7-16%) et le γ -Terpinène (0,3-6,9%). Le faible pourcentage de la famille des monoterpènes oxygénés (1,8-13,6 %) est apparu pour quelques composés tels que le Linalool (0,08-2,7%), le Géraniol (0,9-5,6%) et le δ -Terpinéol (0,1-2,8%).

Les deux familles de sesquiterpènes ont enregistrées des pourcentages importants pouvant atteindre jusqu'à 50%. La famille des hydrocarbures sesquiterpéniques est représentée par des pourcentages faibles aux moyens de γ -Muuroène (0,2-10,5%), Germacrène D (1,4-8,6%), γ -Cadinène (0,3-2,5%) et α -Humulène (0,05-3,6%). Par contre, des pourcentages plus ou moins élevés de Farnésol (4,4-14,8%), α -Bisabolol (1,3-8,4%), β -Eudesmol (0,3-7,4%), α -Muurolol (0,1-9,8%), et α -Eudesmol (0,5-6,9%) font des sesquiterpènes oxygénés la deuxième famille importante dans la composition chimique de ces huiles essentielles.

TABLEAU 4.6 – Composition chimique des huiles essentielles du *Rhanterium adpressum* récolté de différentes régions de l'Algérie.

Composé ^a	Be1	Be3	Be4	Be5	Be6	Be8	Be9	Na10	Na14	Na15	La17	La18	La19	La20	La21	La22	La23	La24	IR ^b
α -Thuyène	0,7	0,4	0,4	0,3	3,9	0,4	5,8	-	0,4	0,6	7,3	8,5	0,3	0,2	0,4	-	-	-	925
α -Pinène	11,7	11,5	8,9	6,2	1,6	8,6	1,8	10,6	10,5	10,6	5,2	1,8	6,5	5,3	6,2	10,8	7,7	11,1	935
Camphène	4,5	3,9	5,8	5,6	-	4,9	-	4,8	2,1	2,3	-	-	4,2	5,5	3,1	1,2	5,9	3,5	948
β -Pinène	-	-	-	-	6,3	15,9	10,5	16,6	18,0	20,6	13,6	-	-	-	-	23,1	16,2	22,6	972
Myrcène	16,1	19,3	15,9	12,5	5,7	9,2	9,5	21,4	7,8	13,0	14,1	15,5	12,8	10,3	12,3	26,5	13,4	15,3	994
1,4-Cinéol	-	-	-	-	0,2	0,5	0,2	0,6	0,7	0,6	0,3	8,1	-	-	-	-	0,3	0,8	1016
α -Terpinène	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1019
<i>p</i> -Cymène	12,7	10,7	16,4	15,9	3,7	6,6	4,9	5,8	6,2	6,6	5,5	-	11,8	19,0	14,0	0,4	-	-	1025
β -Ocimène, (Z)-	0,2	0,2	-	0,2	-	0,2	0,6	0,5	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,1	5,9	5,2	6,7	1041
γ -Terpinène	6,9	6,4	6,3	4,7	0,6	0,5	0,4	1,0	1,2	1,0	0,6	5,4	5,1	4,7	5,8	0,4	0,3	0,5	1059
Terpinolène	-	-	-	-	0,8	2,6	1,7	2,4	2,5	2,8	2,4	-	-	-	-	0,8	0,6	1,4	1082
<i>p</i> -Cymenène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1095
Linalool	0,2	0,2	0,3	0,3	1,0	0,1	0,5	0,7	1,2	1,1	0,4	-	0,3	0,5	0,4	1,8	1,6	2,7	1104
Pinène hydrate, trans-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-	0,7	1,0	0,9	1119
Terpine-1-ol	3,1	2,3	2,3	-	0,2	-	-	-	-	-	0,1	0,2	1,5	2,4	-	0,2	0,3	0,3	1140
δ -Terpinéol	0,8	0,2	0,7	0,1	2,8	2,4	1,5	1,9	2,4	2,2	0,8	0,3	0,5	0,2	0,0	1,6	1,7	2,7	1170
α -Terpinéol	0,3	0,2	0,1	0,2	1,3	0,8	0,7	0,9	1,1	0,8	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4	0,7	0,7	1191
Verbénone	-	-	-	-	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	0,1	1211
Nérol	-	-	-	-	0,2	0,3	0,1	-	-	-	0,1	-	-	-	-	-	0,1	-	1232
Geraniol	5,6	3,0	2,2	2,1	-	-	-	-	-	-	-	2,2	0,0	0,9	0,0	-	-	-	1260
Geranial	3,6	1,0	1,4	1,4	-	-	-	-	-	-	-	0,4	1,4	0,8	1,1	-	-	-	1282
Carvacrol	-	-	-	-	0,3	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	-	-	-	-	-	0,7	0,1	1290
δ -Elemène	-	0,1	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	-	-	-	-	-	-	-	1329
β -Humulène	-	-	-	-	0,9	0,9	0,5	0,6	0,2	0,9	0,7	-	-	-	-	-	-	0,3	1442
α -Humulène	-	-	-	-	0,6	0,4	-	0,3	0,1	0,3	0,4	-	-	-	-	3,6	1,0	0,2	1449
γ -Murolène	-	-	-	-	9,6	8,0	10,5	6,0	10,4	7,1	5,6	-	-	-	-	-	9,1	4,2	1471
Germacrène D	-	-	-	-	4,1	6,0	5,9	4,3	7,5	4,4	8,6	-	-	-	-	1,4	2,7	3,5	1486
β -Bisabolène	-	-	-	-	0,5	0,2	0,5	0,2	0,3	1,4	1,9	-	-	-	-	0,1	0,3	0,1	1506

Continuité :

γ -Cadinène	-	-	-	-	0,8	0,3	2,5	0,6	1,6	1,1	1,6	-	-	-	-	0,2	1,8	0,2	1514
δ -Cadinène	-	-	-	-	1,7	1,4	0,4	1,0	0,0	-	0,1	-	-	-	-	0,4	1,0	0,7	1519
Nérolidol, (E)-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8	0,5	0,7	1550
Germacrène-D-4-ol	-	-	-	-	6,2	5,2	6,5	3,1	4,5	3,6	7,3	-	-	-	-	2,0	4,1	3,7	1570
Spathulénol	-	-	-	-	1,8	0,5	0,8	0,4	0,7	0,3	0,6	-	-	-	-	0,3	0,2	0,1	1574
Caryophyllène oxide	-	-	-	-	0,3	0,1	0,5	0,1	0,3	0,1	0,1	-	-	-	-	0,3	0,3	1,4	1587
α -Humulène oxide	-	-	-	-	3,4	1,7	2,0	1,0	1,8	1,1	1,0	-	-	-	-	-	-	-	1593
α -Murolol	-	-	-	-	9,8	3,1	6,1	0,5	0,1	2,2	1,7	-	-	-	-	2,6	2,1	0,1	1634
β -Eudesmol	-	-	-	-	7,4	6,0	7,1	3,4	0,3	2,4	1,2	-	-	-	-	7,0	4,6	1,4	1634
α -Eudesmol	-	-	-	-	2,1	2,1	2,2	4,9	6,9	3,3	2,6	-	-	-	-	0,5	3,3	5,1	1647
α -Cadinol	-	-	0,5	-	2,2	2,2	1,4	1,3	1,6	1,6	3,2	-	-	-	-	3,6	1,2	2,3	1655
β -Bisabolol	-	-	0,4	-	0,5	0,2	0,3	0,5	0,4	0,5	2,5	-	-	-	-	-	-	1,1	1662
α -Bisabolol	-	-	-	-	8,4	3,1	6,1	1,4	2,0	1,3	3,4	-	-	-	-	2,2	3,7	2,1	1684
Farnésol	6,3	4,4	6,7	5,2	-	-	-	-	-	-	-	14,8	12,9	7,2	9,7	-	-	-	1740
Total identifié	72,7	63,8	68,7	55,5	88,7	94,4	91,5	97,0	93,0	94,3	94,0	57,8	57,7	57,3	53,2	98,4	90,9	96,3	
Monoterpènes hydrocarbures	52,8	52,4	53,7	45,6	22,7	49,3	35,3	63,8	49,5	58,3	49,3	39,6	41,0	45,3	41,8	69,0	49,6	61,8	
Monoterpènes oxygénés	13,6	6,9	7,0	4,2	5,7	3,6	2,7	3,5	4,7	4,2	1,8	3,4	3,8	4,8	1,7	4,6	5,5	7,4	
Total monoterpènes	66,4	59,3	60,7	49,8	28,4	53,0	38,0	67,2	54,2	62,5	51,1	43,0	44,8	50,0	43,5	73,6	55,2	69,2	
Sesquiterpènes hydrocarbures	0,0	0,1	0,4	0,3	18,2	17,3	20,4	13,2	20,2	15,4	19,2	0,0	0,0	0,0	0,0	5,6	16,0	9,2	
Sesquiterpènes oxygénés	6,3	4,4	7,6	5,4	42,1	24,1	33,0	16,6	18,6	16,4	23,7	14,8	12,9	7,2	9,7	19,2	19,8	17,9	
Total sesquiterpènes	6,3	4,4	8,0	5,7	60,3	41,4	53,4	29,7	38,8	31,8	42,9	14,8	12,9	7,2	9,7	24,8	35,8	27,1	

^a Les composés sont répertoriés dans l'ordre de leur élution dans une phase stationnaire (apolaire) de diméthylsilicone avec 5% de groupes phényle.^b Les Indices de Rétention sur la colonne DB-5.

La composition chimique de ces huiles essentielles est similaire à celle trouvée par Elhouiti (2018) avec une variation dans les pourcentages de chaque composé. Les pourcentages élevés de sesquiterpènes, surtout oxygénés, sont aussi remarqués dans l'étude d'Elhouiti (2018). Dans cette étude, les pourcentages élevés en sesquiterpènes sont difficiles à interpréter, mais en se basant sur d'autres études (Sadeghi *et al.*, 2014 ; Demasi *et al.*, 2018), on peut considérer l'influence des facteurs comme l'altitude et la latitude. Sachant que l'altitude moyenne des échantillons faibles en sesquiterpènes est de 692 m et celle des échantillons riches en sesquiterpènes est de 864 m. Ainsi, on trouve, respectivement, les premiers échantillons à 30-31 °N et les deuxièmes à 32-33°N.

4.5.2 Analyse de la variation chimique intra-spécifique des huiles essentielles de *R. adpressum*

Les résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) montrent la présence de deux groupes chimiques distincts expliquant 68,09% de la variance totale (figure 4.13). Sur l'axe F1, ces groupes ont été distingués selon leurs compositions chimiques, alors que l'axe F2 distingue faiblement (16,53 %) les différences entre les régions. Le premier groupe chimique, concernant des échantillons de Béchar, Naama et Laghouat, est dominé par les composés β -Pinène et β -Myrcène (moyenne de 29,9 %). D'autre part, le deuxième groupe concerne des échantillons de Béchar et Laghouat. Il est dominé par β -Myrcène et *p*-Cymène (moyenne de 26,9 %) (figure 4.14).

L'analyse hiérarchique ascendante révèle, aussi, ces deux groupes chimiques où les points centraux importants du dendrogramme sont β -Pinène et β -Myrcène pour le premier groupe et β -Myrcène et *p*-Cymène pour le deuxième groupe (figure 4.15). Ces groupes sont différents de ceux observés par Elhouiti (2018) dans son échantillonnage des régions de Laghouat, Zelfana, Ouargla et El-Goléa. Trois groupes chimiques ont été déterminés : groupe Linalool/ α -Terpinéol, groupe α -Pinène/ β -Myrcène/ α -Terpinéol et un groupe α -Pinène/ β -Myrcène caractéristique pour les échantillons de fleurs. Dans l'étude précédente (tableau 4.5), la composition chimique des huiles essentielles de *R. adpressum* récolté de Ghardaïa montre la dominance des hydrocarbures monoterpéniques précisément α -Pinène, Camphène et β -Pinène et de faibles pourcentages des sesquiterpènes.

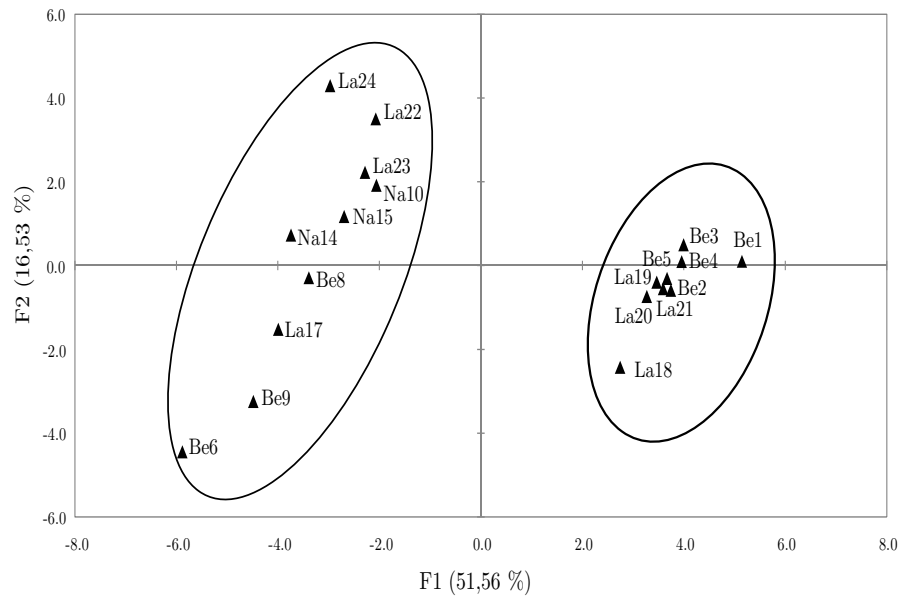


FIGURE 4.13 – Graphe des scores d'ACP de la variation de la composition chimique des huiles essentielles de *R. adpressum*

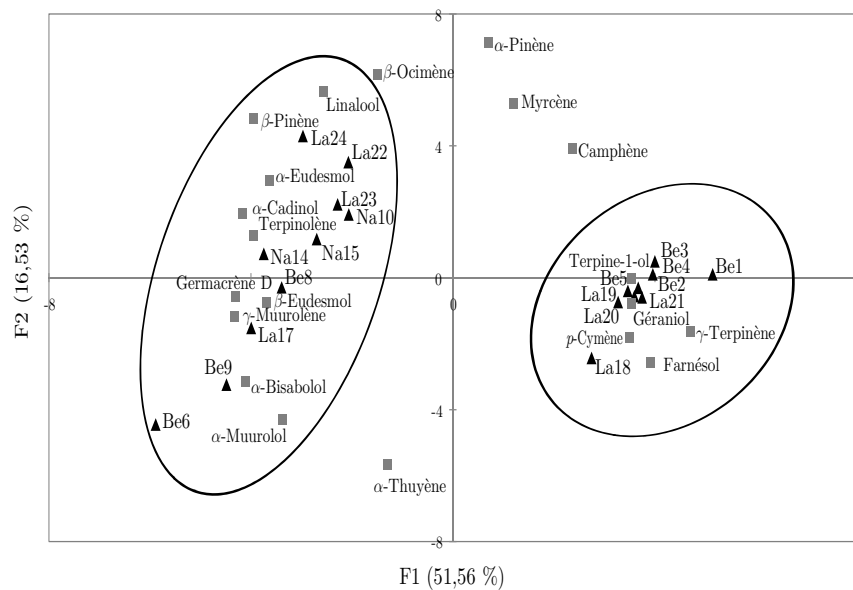


FIGURE 4.14 – Graphe des scores d'ACP avec les variables de la composition chimique de chaque groupe.

La relation statistique des facteurs géo-climatiques d'altitude, de température maximale (Tmax), de température minimale (Tmin) et d'humidité relative avec les deux groupes chimiques a été illustrée dans la figure 4.16. Le groupe β -Pinène/ β -Myrcène est positivement corrélé avec l'altitude (44 %), l'humidité relative (26 %) et négativement avec Tmin (29 %) et Tmax (29 %). Cependant, ces deux derniers facteurs ont corrélé positivement

avec le groupe β -Myrcène/*p*-Cymène à 30 % et 31 %, respectivement. Alors qu'une relation négative a été notée pour ce groupe avec l'altitude (47 %) et l'humidité relative (35 %).

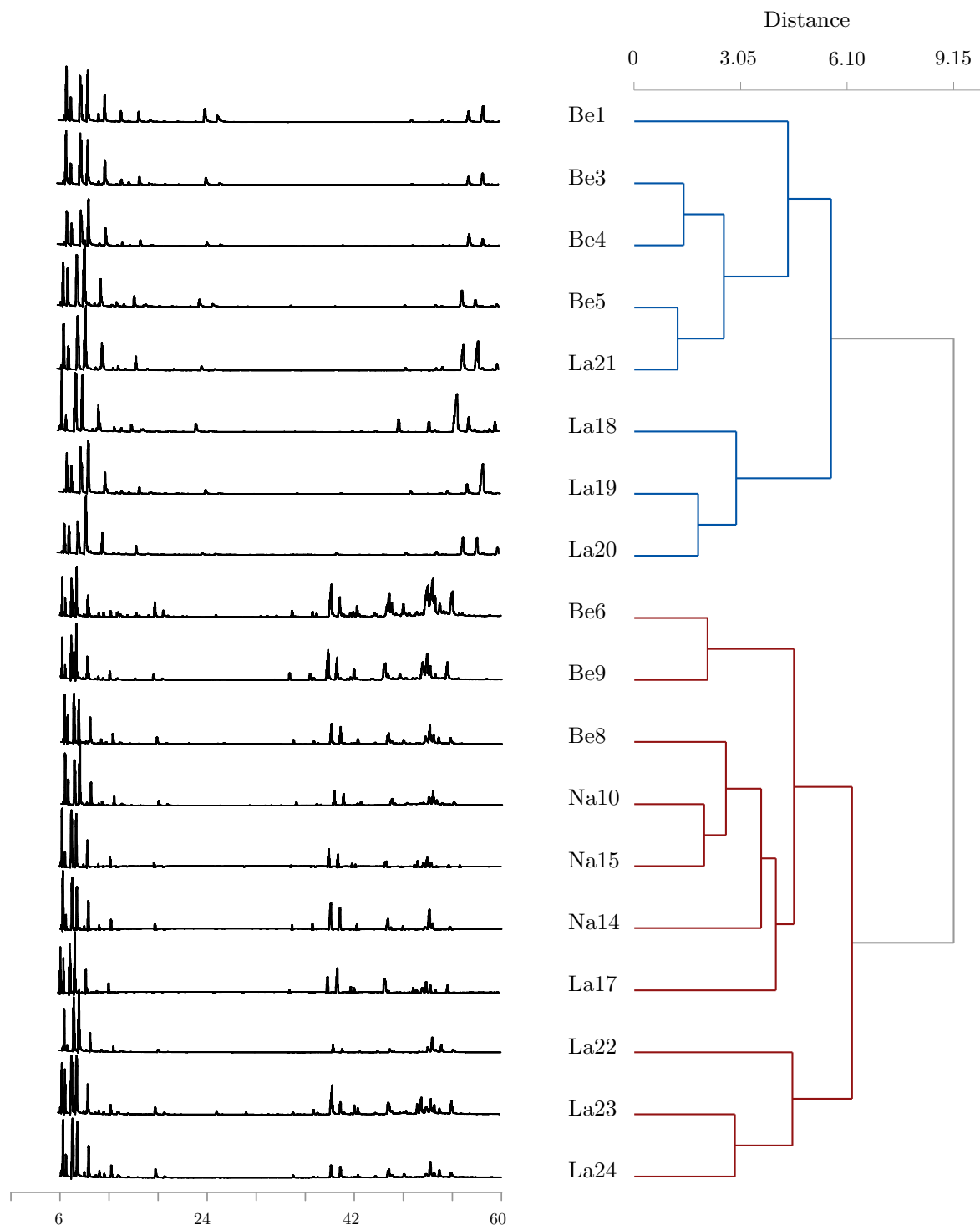


FIGURE 4.15 – Dendrogramme de l'analyse ascendante hiérarchique de la composition chimique des huiles essentielles de *R. adpressum*. Les profils chromatographiques ont été alignés avec SpecAlign 2.4.1 par la méthode de correspondance des pics de 6 à 60 min avec un déplacement maximal de 20 min.

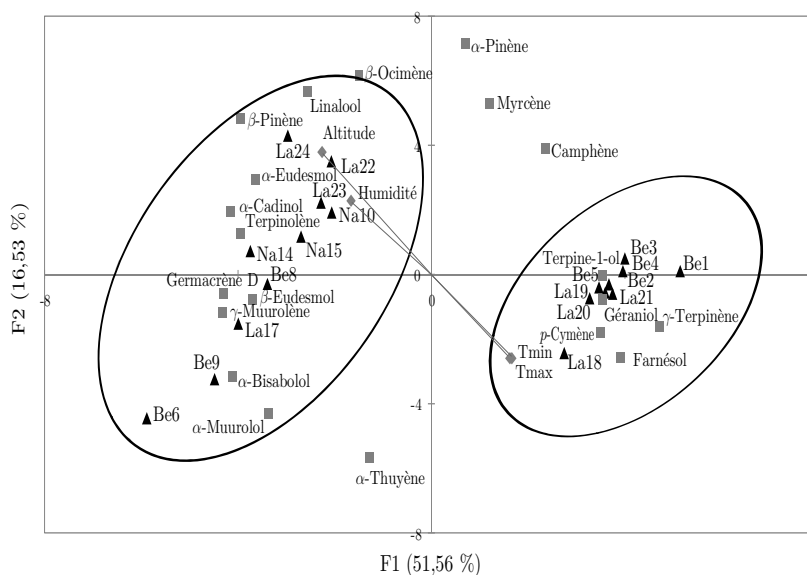


FIGURE 4.16 – Graphe de la corrélation des facteurs géo-climatiques avec les deux groupes chimiques de l'huile essentielle de *R. adpressum*

La différence d'altitude entre les sites des deux groupes est significative ($P \leq 0,05$) où l'élévation moyenne pour les échantillons du groupe β -Pinène/ β -Myrcène est de 878,3 m et pour les échantillons du groupe β -Myrcène/ p -Cymène est de 760,5 m. Pour les autres facteurs la différence entre les sites des deux groupes est non significative ($P \geq 0,05$). La figure 4.17 montre les séries chronologiques des facteurs de Tmin, de Tmax et d'humidité relative, durant le mois de collecte (mars 2021).

Sur l'axe F2, dans les figures 4.13 et 4.15, deux sous groupes peuvent être distingués, au sein des deux grands groupes chimiques. Ces deux sous groupes séparent les échantillons de l'Ouest (Béchar et Naama) de ceux du centre de l'Algérie (Laghouat). Ce résultat est confirmé par des analyses en composantes principales supplémentaires représentant 63,64% et 76,81 % de la variance totale au sein des groupes β -Pinène/ β -Myrcène (annexe F.1) et β -Myrcène/ p -Cymène (annexe G.1), respectivement.

Dans le groupe β -Pinène/ β -Myrcène, les échantillons de Laghouat diffèrent des autres par les très faibles pourcentages d' α -Thuyène et p -Cymène et les grands pourcentages de β -Ocimène et Germacrène D. En revanche, dans le groupe β -Myrcène/ p -Cymène ces échantillons diffèrent des autres par les pourcentages élevés en α -Pinène et Géraniol, tenons en considération le remarquable faible pourcentage des sesquiterpènes hydrocarbures dans ce groupe.

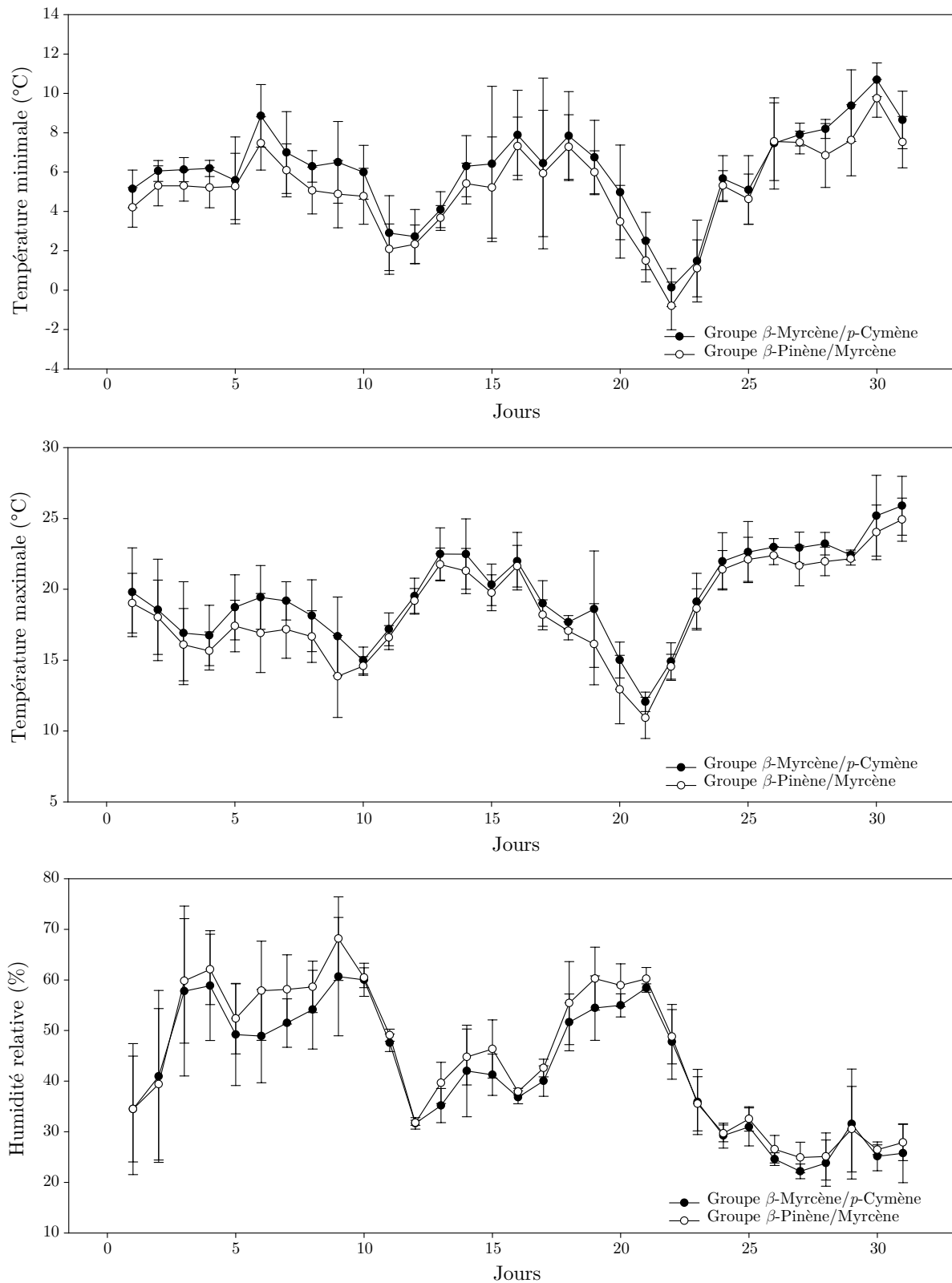


FIGURE 4.17 – Graphes des séries chronologiques du mois de mars 2021 concernant les facteurs climatiques (température minimale, température maximale et humidité relative).

L'évaluation de la variabilité chimique des huiles essentielles comporte l'étude de trois facteurs principaux : *i*) variabilité génétique individuelle, *ii*) variabilité morpho- et ontogénétique *iii*) modifications dues à l'environnement. Cette variabilité peut être *alternative* par la présence ou l'absence d'un composé, régulée par un ou quelques gènes responsables de ce caractère, et/ou *quantitative* par la présence des composés à différentes concentrations ou résultant d'une régulation impliquant plusieurs gènes. Á l'opposé de la variation *alternative*, la variation *quantitative* est influencée par les facteurs environnementaux (Franz, 1993).

Quant aux facteurs influençant la variation *quantitative* des huiles essentielles, ils peuvent être regroupés en facteurs exogènes ou endogènes. L'intensité de la lumière, la température, les précipitations, l'altitude, la latitude et les propriétés physico-chimiques du sol sont des facteurs qui affectent la concentration en terpénoïdes (Barra, 2009). Des études ont montré que l'intensité de la lumière augmente le taux des monoterpènes d'*Ocimum basilicum* L. (Johnson *et al.*, 1999) et *Satureja douglasii* Benth. (Peer et Langenheim, 1998). Ce taux augmente, aussi, en cas de sécheresse chez *Thymus piperella* L. ; en plus d'une relation positive entre l'altitude et la concentration de quelques monoterpènes (Boira et Blanquer, 1998).

En plus de l'altitude, les pourcentages du Limonène, Sabinène, 3-Carène, Myrcène et β -Pinène ont significativement augmenté dans des latitudes élevées chez *Juniperus communis* L. (Martz *et al.*, 2009), alors que dans des basses latitudes, les huiles essentielles d'*Hyptis suaveolens* L. sont riches en sesquiterpènes (Azevedo *et al.*, 2001). L'influence des propriétés chimiques du sol se montre sur le rendement et la composition des huiles essentielles. Dans l'étude de Vaičiulytė *et al.* (2017), la concentration élevée du soufre augmente le pourcentage du Carvacrol et du Linalool et diminue le pourcentage de *p*-Cymène dans les huiles essentielle de *Thymus pulegioides* L.. Ainsi, une grande teneur en phosphore influe positivement la biosynthèse d' α -Terpényl.

Selon les propriétés physiques du sol, il a été montré que dans le cas de *Thymus spinulosus* Ten., le pourcentage des monoterpènes augmente dans le sol calcaire alors que dans un sol siliceux les sesquiterpènes dominent la composition de l'huile essentielle (De Feo *et al.*, 2003). La variation saisonnière peut être, aussi, mentionnée du fait qu'elle est liée à une combinaison de facteurs comme la température, les précipitations et la

radiation. Dans les huiles essentielles de *Mentha longifolia* L., le rendement était élevé en hiver et significativement faible au printemps. Également, le pourcentage des monoterpènes oxygénés est élevé durant l'hiver et faible au printemps (Zouari-Bouassida *et al.*, 2018).

La variation chimique des huiles essentielles peut être due aux facteurs endogènes comme l'âge de la plante, le site de production et d'accumulation des terpènes et la régulation génétique du métabolisme secondaire. Plusieurs études ont rapporté cette variation entre les diverses parties des plantes. L'étude sur *Salvia officinalis* L. a montré que les huiles essentielles des fleurs sont riches en β -Pinène tandis que les huiles des feuilles sont riches en α et β -Thuyones (Perry *et al.*, 1999). De même, entre les feuilles et les fleurs de *Lavandula stoechas* ssp. *stoechas*, une différence significative du pourcentage de 1,8-Cinéol et Myrtényl acétate a été enregistrée (Skoula *et al.*, 1996). Durant le cycle phénologique de *S. officinalis* L., le rendement en huiles essentielles était décroissant en commençant par le bourgeonnement floral jusqu'à la maturation des fruits, alors que le pourcentage de la famille des monoterpènes oxygénés était élevé dans les fruits matures et faibles dans les bourgeons floraux (Mirjalili *et al.*, 2006).

Dans cette étude, deux groupes chimiques intra-spécifiques (β -Pinène/ β -Myrcène et β -Myrcène/*p*-Cymène) ont été observés au sein des huiles essentielles de *R. adpressum*; sachant que des sous groupes peuvent y être, aussi, identifiés. La variation des deux groupes chimiques est en relation élevée avec le facteur d'altitude et faible avec les facteurs de température et d'humidité relative. La différence entre ces résultats et ceux trouvés par Elhouiti (2018) dans les régions de Laghouat, Zelfana, Ouargla et El-Goléa mérite d'être révérifiée par un échantillonnage plus étendu, couvrant toute l'aire de distribution de *R. adpressum*.

La collecte de cette année (2021) du *R. adpressum* a rencontré deux contraintes majeures qui ont limité le nombre et les quantités collectées. La sécheresse a grandement affecté le cycle phénologique de cette espèce, du fait que des surfaces importantes à ElHouaita (Laghouat) et à Béchar contenant des centaines de pieds sont restés secs et le reste des pieds (en touffes) sont parfois très peu feuillés et capitulés ou ne contiennent que quelques nouvelles tiges feuillées, insuffisantes pour l'extraction. La deuxième contrainte était

le surpâturage qui a augmenté la difficulté d'avoir un nombre important et des quantités suffisantes pour l'extraction des huiles essentielles.

Dans l'objectif d'approfondir l'étude sur la variation intra-spécifique des huiles essentielles de *R. adpressum*, il serait nécessaire d'élargir la zone d'échantillonnage pour qu'elle puisse couvrir l'aire de répartition de cette espèce de l'ouest au centre de l'Algérie. En parallèle, il serait aussi important d'étudier la composition physico-chimique des sols, les interactions plante-plantes et plante-animaux et l'influence des facteurs bioclimatiques.

Conclusion

Conclusion

Le *Rhanterium adpressum* est une plante endémique algérienne répartie de l'ouest au centre du pays (4°E, 32-33°N) dans des habitats à caractère climatique aride. C'est une espèce de valeurs fourragère, écologique et biologique importante mais qui reste encore très peu étudiée. Ce travail, traitant la chorologie locale de cette espèce et la chémo-géographie de ses huiles essentielles, a été concluant. En effet, il a permis d'atteindre les objectifs fixés au début, à savoir l'étude de la distribution des espèces : *R. adpressum*, *R. intermedium* et *R. suaveolens* sous l'influence des conditions bioclimatiques, actuelles et futures, et l'évaluation de la variabilité de la composition chimique des huiles essentielles de *R. adpressum* provenant de différentes localités algériennes.

En premier lieu, ces travaux de recherches ont permis par la modélisation de la distribution de 30 espèces de la tribu des Inulées en Algérie d'obtenir deux modèles avec des valeurs moyennes d'AUC de $0,987 \pm 0,01$ et $0,971 \pm 0,02$, reflétant un excellent pouvoir prédictif. Trois variables bioclimatiques ont contribué principalement au premier modèle et quatre au second avec des contributions cumulées de 83,8% et 79%, élucidant, respectivement, les différences entre les espèces des deux principales zones climatiques d'Algérie : le Tell et le Sahara.

Les niches bidimensionnelles d'espèces des Inulées algériennes ont permis de distinguer ces deux groupes avec la distribution de 18 espèces Tell, caractérisées par de fortes précipitations (14-18 °C, 400-1000 mm) et les 12 autres espèces réparties dans des environnements chauds et secs (17-24 °C, 20-200 mm). La modélisation de la distribution dans les conditions futures a montré que les habitats de la région saharienne seraient beaucoup moins convenables à ces espèces avec une variation de la température annuelle moyenne pouvant aller jusqu'à 20% et une diminution des précipitations annuelles, qui pourraient atteindre 11 et 15%.

Deux autres modèles de distribution avec une grande précision prédictive ont été obtenus pour *R. adpressum* ($AUC = 0,98 \pm 0,006$) et *R. intermedium/suaveolens* ($AUC = 0,98 \pm 0,01$). Les précipitations du mois le plus sec et la saisonnalité de la température ont contribué au modèle de *R. adpressum*, avec respectivement 27,8% et 21,8%. En revanche, les précipitations et la température moyenne du trimestre le plus sec ont le plus contribué au modèle de *R. intermedium/suaveolens*, avec 26,4% et 20,8%, respectivement. Les courbes de réponse des espèces aux facteurs bioclimatiques et à l'élévation montrent que *R. adpressum* préfère les habitats de haute altitude (888,74 m), moins chauds (18,65 °C) et pluvieux (140,72 mm). Les espèces de *R. intermedium/suaveolens* sont réparties dans des zones plus chaudes (21,61 °C), moins élevée (255,18 m) et moins pluvieuses 86,62 mm.

L'analyse de neuf échantillons de sol provenant des habitats de *R. adpressum* montre un caractère sableux (77-96%), alcalin et calcaire avec une conductivité électrique comprise entre 0,2 et 1,8 dS/m à 20 °C. La composition chimique des familles de terpénoïdes pendant une période de 5 mois a été dominée par les hydrocarbures monoterpéniques (70-90%) suivis par les monoterpènes oxygénés (4,5-9,2%), les sesquiterpènes hydrocarbonés (1,6-9,9%) et les sesquiterpènes oxygénés (4,3-7,2%).

La collecte de différentes régions de l'Algérie a permis de montrer la variation intra-spécifique au sein des populations de *R. adpressum*. Les teneurs en huiles essentielles ont été importantes, allant de 7,2 à 20,9 ml/kg. L'analyse chromatographique a montré la dominance de la famille des hydrocarbures monoterpéniques (22,7-69 %) suivie de sesquiterpènes oxygénés (4,4-42,1 %) et les faibles pourcentages en monoterpènes oxygénés (1,8-13,6 %) et sesquiterpènes hydrocarbures (0,06-20,4 %).

Les analyses multivariées ont permis de distinguer deux groupes chimiques expliquant 68,09 % de la variance totale. Le premier groupe concerne les échantillons de Béchar, Naama et Laghouat. Il est dominé par les deux composés β -Pinène et β -Myrcène (moyenne de 29,9 %). Le deuxième groupe représenté par les échantillons de Béchar et Laghouat est dominé par les composés β -Myrcène et *p*-Cymène (moyenne de 26,9 %). Au sein de ces deux groupes, d'autres sous groupes ont été observés sur l'axe F2 de l'ACP, illustrant la variabilité spatiale de ces huiles essentielles.

La corrélation des facteurs géo-climatiques de l'altitude, de la température minimale, de la température maximale et de l'humidité relative a montré les relations positive de l'altitude (44 %) et de l'humidité (26 %) et négative de Tmin (29 %) et Tmax (29 %), avec le groupe β -Pinène/ β -Myrcène. Par contre, une relation négative de l'altitude (47 %) et de l'humidité (35 %) et positive de Tmin (30 %) et Tmax (31 %) a été notée avec le groupe β -Myrcène/*p*-Cymène.

Dans la continuité des études sur le genre *Rhanterium*, les résultats présentés par ce travail ont permis d'approfondir les connaissances sur le *R. adpressum* et les autres espèces algériennes (*R. intermedium* et *R. suaveolens*). Ils ont permis, aussi, d'évaluer la variabilité intra-spécifique au sein des populations de *R. adpressum* dans le but de caractériser des chémotypes. Cependant, de nouvelles perspectives peuvent être envisagées :

- Enrichir les données éco-biologiques sur les trois espèces du *Rhanterium* algérien ;
- Évaluation de la diversité génétique des populations du genre *Rhanterium* ;
- Étude des structures génétiques des populations de l'espèce hybride *R. intermedium* ;
- Procéder à l'étude de la germination des akènes de *R. adpressum* et la mise en culture dans des conditions contrôlées.

Bibliographie

Bibliographie

- Abbas, F., Ke, Y., Yu, R., Yue, Y., Amanullah, S., Jahangir, M. M. et Fan, Y. 2017. Volatile terpenoids : multiple functions, biosynthesis, modulation and manipulation by genetic engineering. *Planta*, **246**(5):803–816.
- Abobatta, W. 2019. Drought adaptive mechanisms of plants—a review. *Advances in Agriculture and Environmental Science*, **2**(1):62–65.
- Aguilée, R., Gascuel, F., Lambert, A. et Ferriere, R. 2018. Clade diversification dynamics and the biotic and abiotic controls of speciation and extinction rates. *Nature communications*, **9**(1):3013.
- Al-Namazi, A. 2019. Effects of plant-plant interactions and herbivory on the plant community structure in an arid environment of Saudi Arabia. *Saudi journal of biological sciences*, **26**(7):1513–1518.
- Alimohammadi, M., Yadegari, M. et Shirmardi, H. A. 2017. Effect of elevation and phenological stages on essential oil composition of *Stachys*. *Turkish Journal of Biochemistry*, **42**(6):647–656.
- Alsafar, M. S. et Al-Hassan, Y. M. 2009. Effect of nitrogen and phosphorus fertilizers on growth and oil yield of indigenous mint (*Mentha longifolia* L.). *Biotechnology*, **8**(3):380–384.
- Anderberg, A. A. 1989. Phylogeny and reclassification of the tribe *Inuleae* (*Asteraceae*). *Canadian Journal of Botany*, **67**(8):2277–2296.
- Araújo, M. B., Ferri-Yáñez, F., Bozinovic, F., Marquet, P. A., Valladares, F. et Chown, S. L. 2013. Heat freezes niche evolution. *Ecology letters*, **16**(9):1206–1219.
- Araújo, M. B., Pearson, R. G., Thuiller, W. et Erhard, M. 2005. Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, **11**(9):1504–1513.

- Arriagada, J. E. 1998. The genera of *Inuleae* (*Compositae* ; *Asteraceae*) in the Southeastern United States. *Harvard Papers in Botany*, **3**(1):1–48.
- Attia, S., Grissa, K. L., Lognay, G., Heuskin, S., Mailleux, A.-C. et Hance, T. 2011. Chemical composition and acaricidal properties of *Deverra scoparia* essential oil (Araliales : *Apiaceae*) and blends of its major constituents against *Tetranychus urticae* (Acari : Tetranychidae). *Journal of Economic Entomology*, **104**(4):1220–1228.
- Awad, M. et Abdelwahab, A. 2016. Chemical diversity of essential oils from flowers, leaves, and stems of *Rhanterium epapposum* Oliv. growing in northern border region of Saudi Arabia. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, **6**(9):767–770.
- Azevedo, N. R., Campos, I. F., Ferreira, H. D., Portes, T. A., Santos, S. C., Seraphin, J. C., Paula, J. R. et Ferri, P. H. 2001. Chemical variability in the essential oil of *Hyptis suaveolens*. *Phytochemistry*, **57**(5):733–736.
- Babushok, V., Linstrom, P. et Zenkevich, I. 2011. Retention indices for frequently reported compounds of plant essential oils. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, **40**(4):043101.
- Barra, A. 2009. Factors affecting chemical variability of essential oils : a review of recent developments. *Natural product communications*, **4**(8):1147–1154.
- Battandier, J. A. et Trabut, L. 1888. *Flore de l'Algérie*. Vol. 1. Alger : Jourdan A.
- Bedel, L. 1889. Coléoptères du nord de l'Afrique. *Annales de la Société entomologique de France*, **9**:85–100.
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W. et Courchamp, F. 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters*, **15**(4):365–377.
- Benhassaini, H., Mehdadi, Z., Hamel, L. et Belkhodja, M. 2007. Phytoécologie de *Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica* dans le Nord-Ouest algérien. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, **18**(3):199–205.
- Beniston, W. S. 1984. *Fleurs de l'Algérie*. Alger : ENL.
- Boira, H. et Blanquer, A. 1998. Environmental factors affecting chemical variability of essential oils in *Thymus piperella* L.. *Biochemical systematics and Ecology*, **26**(8):811–822.

- Bonnet, E. et Doumet-Adanson, N. 1896. *Exploration scientifique de la Tunisie. Catalogue raisonné des plantes vasculaires de la Tunisie*. Imprimerie nationale, Paris.
- Boussoussa, H. 2010. Activités antioxydante et antimicrobienne des extraits phénoliques des fleurs de *Rhanterium adpressum*. Mémoire de magister. Université Amar Telidji.
- Boussoussa, H., Khacheba, I., Djeridane, A., Mellah, N. et Yousfi, M. 2016. Antibacterial activity from *Rhanterium adpressum* flowers extracts, depending on seasonal variations. *Industrial Crops and Products*, **83**:44–47.
- Brown, G. W. 1974. *Desert biology : special topics on the physical and biological aspects of arid regions*. Vol. 11. Academic Press, Inc.
- Calatayud, P.-A., Garrec, J.-P. et Nicole, M. 2013. Adaptation des plantes aux stress environnementaux. *in* 'Interactions insectes-plantes'. Editions Quae. pp. 229–245.
- Cassini, H. 1821. Tableau méthodique des genres de la tribu des Inulées. *Bull. Sci., par la société philomatique de Paris*, :126–128.
- Chauhan, N., Singh, S., Haider, S. et Lohani, H. 2013. Influence of phenological stages on yield and quality of oregano (*Origanum vulgare* L.) under the agroclimatic condition of Doon valley (Uttarakhand). *Indian journal of pharmaceutical sciences*, **75**(4):489.
- Chehma, A. et Abdelhamid, H. 2012. Equations de prévision du poids des principales plantes spontanées vivaces des parcours sahariens. *Fourrages*, **211**:239–242.
- Chehma, A. et Youcef, F. 2009. Variations saisonnières des caractéristiques floristiques et de la composition chimique des parcours sahariens du Sud-Est algérien. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, **20**(4):373–381.
- Chemsa, A. E., Erol, E., Öztürk, M., Zellagui, A., Özgür, C., Gherraf, N. et Duru, M. E. 2016. Chemical constituents of essential oil of endemic *Rhanterium suaveolens* Desf. growing in Algerian Sahara with antibiofilm, antioxidant and anticholinesterase activities. *Natural product research*, **30**(18):2120–2124.
- Chen, Y., Li, C., Zhang, B., Yi, J., Yang, Y., Kong, C., Lei, C. et Gong, M. 2019. The role of the late embryogenesis-abundant (LEA) protein family in development and the abiotic stress response : a comprehensive expression analysis of potato (*Solanum Tuberosum*). *Genes*, **10**(2):148.

- Choudhury, F. K., Rivero, R. M., Blumwald, E. et Mittler, R. 2017. Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination. *The Plant Journal*, **90**(5):856–867.
- Chrétien, P. 1916. Lépidoptères du Nord de l'Afrique. *Annales de la Société entomologique de France*, **LXXXV**:369–502.
- Clevenger, J. 1928. Apparatus for the determination of volatile oil. *The Journal of the American Pharmaceutical Association*, **17**(4):345–349.
- Cosson, E. 1855. Liste de plantes observées par M. Rebold dans le Sahara algérien. *Bulletin de la Société botanique de France*, **2**:242–255.
- Dagar, J. 2005. Salinity research in India : An overview. *Bulletin of the National Institute of Ecology*, **15**:69–80.
- De Feo, V., Bruno, M., Tahiri, B., Napolitano, F. et Senatore, F. 2003. Chemical composition and antibacterial activity of essential oils from *Thymus spinulosus* Ten.(*Lamiaceae*). *Journal of agricultural and food chemistry*, **51**(13):3849–3853.
- Dearing, M. D., Foley, W. J. et McLean, S. 2005. The influence of plant secondary metabolites on the nutritional ecology of herbivorous terrestrial vertebrates. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, **36**:169–189.
- Degenhardt, J. 2008. Ecological roles of vegetative terpene volatiles. in 'Induced plant resistance to herbivory'. Springer. pp. 433–442.
- Dekebo, A., Dagne, E., Curry, P., Gautun, O. R. et Aasen, A. J. 2002. Dammarane triterpenes from the resins of *Commiphora confusa*. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, **16**(1):81–86.
- Delgado, A. et Gómez, J. A. 2016. The soil. physical, chemical and biological properties. in 'Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture'. Springer. pp. 15–26.
- Demasi, S., Caser, M., Lonati, M., Cioni, P. L., Pistelli, L., Najar, B. et Scariot, V. 2018. Latitude and altitude influence secondary metabolite production in peripheral alpine populations of the Mediterranean species *Lavandula angustifolia* Mill.. *Frontiers in plant science*, **9**:983.

- Demirci, B., Yusufoglu, H. S., Tabanca, N., Temel, H. E., Bernier, U. R., Agramonte, N. M., Alqasoumi, S. I., Al-Rehaily, A. J., Başer, K. H. C. et Demirci, F. 2017. *Rhanterium epapposum* Oliv. essential oil : Chemical composition and antimicrobial, insect-repellent and anticholinesterase activities. *Saudi Pharmaceutical Journal*, **25**(5):703–708.
- Dereje, M. et Udén, P. 2005. The browsing dromedary camel : I. behaviour, plant preference and quality of forage selected. *Animal feed science and technology*, **121**(3-4):297–308.
- Desfontaines, R. 1798. *Flora Atlantica, sive Historia Plantarum, quae in Atlante, Agrotunetano et algeriensi crescunt*. Vol. 2. Panckouckes. Paris.
- Despois, J. et Raynal, R. 1975. *Géographie de l'Afrique du Nord-Ouest*. Payot, Paris.
- Dietz, T. et Veldhuizen, E. 2004. The world's drylands : a classification. in 'The Impact of Climate Change on Drylands'. Springer. pp. 19–26.
- Dregne, H. E. 1976. *Soils of arid regions*. Vol. 6. Elsevier.
- El Jery, A., Bouabid, F. et Rashid, M. M. 2018. Study of chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of *Oudneya africana* oils from stems, leaves, and flowers. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, **21**(4):1096–1106.
- Elhouiti, F. 2009. Composition chimique, activités antimicrobienne et antioxydante des huiles essentielles de *Rhanterium adpressum*. Mémoire de magister. Université Amar Telidji.
- Elhouiti, F. 2018. Valorisation des huiles essentielles de *Rhanterium adpressum* Coss. & Durieu par analyse chimique et étude de leurs bioactivités. Thèse de Doctorat en Sciences. Université Kasdi Merbah. Ouargla.
- Elhouiti, F., Tahri, D., Ouinten, M. et Yousfi, M. 2020. *In silico* assessment of *Rhanterium adpressum* sesquiterpenes inhibitory effect on 3 and 15-*O*-trichothecene acetyltransferases. *Nova Biotechnologica et Chimica*, **19**(1):30–36.
- Elhouiti, F., Tahri, D., Seba, M., Ouinten, M., Gaydou, E. et Yousfi, M. 2016. Inhibition of *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* by essential oils of flowers and stems of *Rhanterium adpressum*. *PhOL PharmacologyOnline*, **3**(22):141–150.

- Elhouiti, F., Tahri, D., Takhi, D., Quinten, M., Barreau, C., Verdal-Bonnin, M. N., Bombarda, I. et Yousfi, M. 2017. Variability of composition and effects of essential oils from *Rhanterium adpressum* Coss. & Durieu against mycotoxinogenic *Fusarium* strains. *Archives of Microbiology*, **199**(10):1345–1356.
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A. *et al.* 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, **29**(2):129–151.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E. et Yates, C. J. 2011. A statistical explanation of maxent for ecologists. *Diversity and distributions*, **17**(1):43–57.
- Emongor, V., Chweya, J., Keya, S. et Munavu, R. 1990. Effect of nitrogen and phosphorus on the essential oil yield and quality of chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) flowers. *East African Agricultural and Forestry Journal*, **55**(4):261–264.
- Erbaş, S., Kucukyumuk, Z., Baydar, H., Erdal, I. et Sanli, A. 2017. Effects of different phosphorus doses on nutrient concentrations as well as yield and quality characteristics of lavandin (*Lavandula × intermedia* Emeric ex Loisel. var. Super). *Turkish Journal Of Field Crops*, **22**(1):32–38.
- Evans, W. 2002. Phytochemical variation within a species. in 'Trease & Evans Pharmacognosy (15Th Edition)'. Elsevier. pp. 80–90.
- Feeny, P. 1976. Plant apparency and chemical defense. in 'Biochemical interaction between plants and insects'. Springer. pp. 1–40.
- Franz, C. 1993. Genetics. in 'Volatile oil crops : their biology, biochemistry, and production'. Longman Scientific and Technical. pp. 63–96.
- Friedjung, A. Y., Choudhary, S. P., Dudai, N. et Rachmilevitch, S. 2013. Physiological conjunction of allelochemicals and desert plants. *PloS one*, **8**(12):e81580.
- Friedman, J. 1987. Allelopathy in desert ecosystems. in 'Allelochemicals : Role in Agriculture and Forestry'. ACS Publications. pp. 53–68.
- Gamo, M., Shinoda, M. et Maeda, T. 2013. Classification of arid lands, including soil degradation and irrigated areas, based on vegetation and aridity indices. *International journal of remote sensing*, **34**(19):6701–6722.

- Gaur, M. K. et Squires, V. R. 2018. *Geographic Extent and Characteristics of the World's Arid Zones and Their Peoples*. Springer International Publishing. Cham. pp. 3–20.
- Gauthier-Pilters, H. 1961. Observations sur l'écologie du dromadaire dans le Sahara Nord-Occidental. *Mammalia*, **25**(2):195–280.
- Gentil, A. 1923. *Dictionnaire étymologique de la flore française*. Lechevalier P. Paris.
- Gilmour, J. S. et Gregor, J. 1939. Demes : a suggested new terminology. *Nature*, **144**(3642):333.
- Giuliani, C., Ascrizzi, R., Lupi, D., Tassera, G., Santagostini, L., Giovanetti, M., Flamini, G. et Fico, G. 2018. *Salvia verticillata* : Linking glandular trichomes, volatiles and pollinators. *Phytochemistry*, **155**:53–60.
- Gómez, J. M., Zamora, R., Hódar, J. A. et García, D. 1996. Experimental study of pollination by ants in Mediterranean high mountain and arid habitats. *Oecologia*, **105**(2):236–242.
- Graham, C. H. et Hijmans, R. J. 2006. A comparison of methods for mapping species ranges and species richness. *Global Ecology and biogeography*, **15**(6):578–587.
- Granero, A. M., Sanz, J. M. G., Gonzalez, F. J. E., Vidal, J. L. M., Dornhaus, A., Ghani, J., Serrano, A. R. et Chittka, L. 2005. Chemical compounds of the foraging recruitment pheromone in bumblebees. *Naturwissenschaften*, **92**(8):371–374.
- Hamia, C., Gourine, N., Boussoussa, H., Saidi, M., Gaydou, E. M. et Yousfi, M. 2013. Chemical composition and antioxidant activity of the essential oil and fatty acids of the flowers of *Rhanterium adpressum*. *Natural product communications*, **8**(8):1171–1174.
- Hantson, S., Knorr, W., Schurgers, G., Pugh, T. A. et Arneth, A. 2017. Global isoprene and monoterpene emissions under changing climate, vegetation, CO₂ and land use. *Atmospheric Environment*, **155**:35–45.
- Hegazy, M.-E. F., Mohamed, A. E.-H. H., El-Razek, M. H. A., Hammouda, F. M., Hassan, N. M., Mahalel, U. A., El-Halawany, A. M., Mahmoud, A. A., Karchesy, J., Hirata, T. et al. 2007. Genus *Chrysanthamnus* : A source of bioactive compounds. *Natural Product Communications*, **2**(9):951–957.

- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. et Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, **25**(15):1965–1978.
- Hijmans, R. J., Schreuder, M., De la Cruz, J. et Guarino, L. 1999. Using gis to check co-ordinates of genebank accessions. *Genetic resources and crop evolution*, **46**(3):291–296.
- Hoekstra, J. M., Molnar, J. L., Jennings, M., Revenga, C., Spaulding, M. *et al.* 2010. *The Atlas of Global Conservation*. Vol. 67. University of California Press Berkeley, CA.
- Hoffmann, J. J., Aladesanmi, A. J., Hutter, L. K. et McLaughlin, S. P. 1994. Triterpene acids from *Cowainea mexicana*. *Planta medica*, **60**(01):95–95.
- Holzapfel, C. et Mahall, B. E. 1999. Bidirectional facilitation and interference between shrubs and annuals in the Mojave Desert. *Ecology*, **80**(5):1747–1761.
- Houari, K., Chehma, A. et Zerria, A. 2012. Etude de quelques paramètres d'adaptation anatomique des principales plantes vivaces spontanées dans la région de Ouargla (Algérie). *Sécheresse*, **23**(4):284–288.
- Hua, X. et Wiens, J. J. 2013. How does climate influence speciation?. *The American Naturalist*, **182**(1):1–12.
- Jafari, M., Tavili, A., Panahi, F., Esfahan, E. Z. et Ghorbani, M. 2018. Characteristics of arid and desert ecosystems. *in* 'Reclamation of Arid Lands'. Springer. pp. 21–91.
- Jerbi, A., Zehri, S., Abdnnabi, R., Gharsallah, N. et Kammoun, M. 2016. Essential oil composition, free-radical-scavenging and antibacterial effect from stems of *Ephedra alata alenda* in Tunisia. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, **19**(6):1503–1509.
- Jobbágy, E. G. et Jackson, R. B. 2004. The uplift of soil nutrients by plants : biogeochemical consequences across scales. *Ecology*, **85**(9):2380–2389.
- Johnson, C. B., Kirby, J., Naxakis, G. et Pearson, S. 1999. Substantial UV-B-mediated induction of essential oils in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Phytochemistry*, **51**(4):507–510.
- Khacheba, I., Djeridane, A. et Yousfi, M. 2014. Twenty traditional Algerian plants used in diabetes therapy as strong inhibitors of α -amylase activity. *International Journal of Carbohydrate Chemistry*, **2014**:1–12.

- Klepzig, K. D., Kruger, E. L., Smalley, E. B. et Raffa, K. F. 1995. Effects of biotic and abiotic stress on induced accumulation of terpenes and phenolics in red pines inoculated with bark beetle-vectored fungus. *Journal of Chemical Ecology*, **21**(5):601–626.
- Kumar, S. et Stohlgren, T. J. 2009. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and the Natural Environment*, **1**(4):094–098.
- Lago, J. H. G., Fávero, O. A. et Romoff, P. 2006. Microclimatic factors and phenology influences in the chemical composition of the essential oils from *Pittosporum undulatum* Vent. leaves. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, **17**(7):1334–1338.
- Leins, P. 1971. Pollensystematische studien an Inuleen : 1. Tarchonanthinae, Plucheinae, Inulinae, Buphthalmiinae. *Bot. Jahrb*, **91**(1):91–146.
- Lopes, S., Moresco, R., Peruch, L. A. M., Rocha, M. et Maraschin, M. 2017. UV-Vis spectrophotometry and chemometrics as tools for recognition of the biochemical profiles of organic banana peels (*Musa* sp.) according to the seasonality in Southern Brazil. in ‘International Conference on Practical Applications of Computational Biology & Bioinformatics’. Springer. pp. 289–296.
- Loreto, F., Förster, A., Dürr, M., Csiky, O. et Seufert, G. 1998. On the monoterpene emission under heat stress and on the increased thermotolerance of leaves of *Quercus ilex* L. fumigated with selected monoterpenes. *Plant, Cell & Environment*, **21**(1):101–107.
- Losos, J. B. et Schluter, D. 2000. Analysis of an evolutionary species–area relationship. *Nature*, **408**(6814):847.
- Lucas, M. H. 1858. Note communiquée. In *Annales de la Société entomologique de France*, **6**:CLXXVII–CLXXXIII.
- Luzuriaga, A. L., Sánchez, A. M., Maestre, F. T. et Escudero, A. 2012. Assemblage of a semi-arid annual plant community : abiotic and biotic filters act hierarchically. *PloS One*, **7**(7):e41270.
- Maatooq, G. T. 2003. Microbiological and chemical transformations of argentatin B. *Zeitschrift für Naturforschung C*, **58**(3-4):249–255.

- Magalhães, D. M., Da Silva, I. T. F. A., Borges, M., Laumann, R. A. et Blassioli-Moraes, M. C. 2019. *Anthonomus grandis* aggregation pheromone induces cotton indirect defence and attracts the parasitic wasp *Bracon vulgaris*. *Journal of experimental botany*, **70**(6):1891–1901.
- Makhloufi, A., Larbi, L. B., Moussaoui, A., Lazouni, H. A., Romane, A., Wanner, J., Schmidt, E., Jirovetz, L. et Höferl, M. 2015. Chemical composition and antifungal activity of *Aaronsohnia pubescens* essential oil from Algeria. *Natural Product Communications*, **10**(1):149–151.
- Mann, J. 1987. *Secondary metabolism*. Oxford University Press.
- Martz, F., Peltola, R., Fontanay, S., Duval, R. E., Julkunen-Tiitto, R. et Stark, S. 2009. Effect of latitude and altitude on the terpenoid and soluble phenolic composition of juniper (*Juniperus communis*) needles and evaluation of their antibacterial activity in the boreal zone. *Journal of agricultural and food chemistry*, **57**(20):9575–9584.
- McNeely, J. 2003. Biodiversity in arid regions : Values and perceptions. *Journal of Arid Environments*, **54**(1):61–70.
- Mirjalili, M. H., Salehi, P., Sonboli, A. et Vala, M. M. 2006. Essential oil variation of *Salvia officinalis* aerial parts during its phenological cycle. *Chemistry of natural compounds*, **42**(1):19–23.
- Noy-Meir, I. 1973. Desert ecosystems : Environment and producers. *Annual review of ecology and systematics*, **4**(1):25–51.
- Nylinder, S. et Anderberg, A. A. 2015. Phylogeny of the *Inuleae* (*Asteraceae*) with special emphasis on the *Inuleae-Plucheinae*. *Taxon*, **64**(1):110–130.
- Ormeño, E., Fernandez, C., Bousquet-Mélou, A., Greff, S., Morin, E., Robles, C., Vila, B. et Bonin, G. 2007*b*. Monoterpene and sesquiterpene emissions of three Mediterranean species through calcareous and siliceous soils in natural conditions. *Atmospheric Environment*, **41**(3):629 – 639.
- Ormeño, E., Mevy, J., Vila, B., Bousquet-Mélou, A., Greff, S., Bonin, G. et Fernandez, C. 2007*a*. Water deficit stress induces different monoterpene and sesquiterpene emission changes in Mediterranean species. relationship between terpene emissions and plant water potential. *Chemosphere*, **67**(2):276–284.

- Osman, A. 2006. Contributions to the pollen morphology of the tribe *Inuleae* (subfamily Asteroideae-Compositae) in the flora of Egypt. *Feddes Repertorium : Zeitschrift für botanische Taxonomie und Geobotanik*, **117**(3-4):193–206.
- Ozenda, P. 2004. *Flore et végétation du Sahara*. 3 edn. CNRS Editions.
- Parente, J. P. et da Silva, B. P. 2009. Bioactive complex triterpenoid saponins from the *Leguminosae* family. *Natural Product Communications*, **4**(1):1934578X0900400131.
- Peer, W. A. et Langenheim, J. H. 1998. Influence of phytochrome on leaf monoterpene variation in *Satureja douglasii*. *Biochemical systematics and ecology*, **26**(1):25–34.
- Perry, N. B., Anderson, R. E., Brennan, N. J., Douglas, M. H., Heaney, A. J., McGimpsey, J. A. et Smallfield, B. M. 1999. Essential oils from dalmatian sage (*Salvia officinalis* L.) : variations among individuals, plant parts, seasons, and sites. *Journal of agricultural and food chemistry*, **47**(5):2048–2054.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P. et Schapire, R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, **190**(3):231–259.
- Pramanik, M., Paudel, U., Mondal, B., Chakraborti, S. et Deb, P. 2018. Predicting climate change impacts on the distribution of the threatened *Garcinia indica* in the Western Ghats, India. *Climate Risk Management*, **19**:94–105.
- Prasad, A., Chattopadhyay, A., Chand, S., Naqvi, A. et Yadav, A. 2006. Effect of soil sodicity on growth, yield, essential oil composition, and cation accumulation in rose-scented geranium. *Communications in soil science and plant analysis*, **37**(13-14):1805–1817.
- Pugnaire, F. I., Haase, P. et Puigdefabregas, J. 1996. Facilitation between higher plant species in a semiarid environment. *Ecology*, **77**(5):1420–1426.
- Pulliam, H. 2000. On the relationship between niche and distribution. *Ecology Letters*, **3**(4):349–361.
- Quattrocchi, U. 1999. *CRC World Dictionary of Plant Names : Common Names, Scientific Names, Eponyms, Synonyms, and Etymology*. Vol. 4. CRC Press.
- Quézel, P. et Santa, S. 1963. *Nouvelle flore d'Algérie et des régions désertiques méridionales*. Vol. 2. CNRS. Paris.

- Ragonot, M. E. L. 1892. Description communiquée. In *Annales de la Société Entomologique de France*, **LXI**:LXXXII–LXXXIII.
- Reese, G. 1957. Über die polyploidiespektren in der nordsaharischen wüstenflora. *Flora oder Allgemeine Botanische Zeitung*, **144**(4):598–634.
- Renwick, J. A. A. 2001. Variable diets and changing taste in plant–insect relationships. *Journal of Chemical Ecology*, **27**(6):1063–1076.
- Richardson, B. A., Shaw, N. L. et Pendleton, R. L. 2012. Plant vulnerabilities and genetic adaptation. *Climate change in grasslands, shrublands, and deserts of the interior American West : a review and needs assessment. General Technical Report RMRS-GTR-285. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado, USA*, :48–59.
- Rodriguez-Concepción, M. et Boronat, A. 2002. Elucidation of the methylerythritol phosphate pathway for isoprenoid biosynthesis in bacteria and plastids. a metabolic milestone achieved through genomics. *Plant physiology*, **130**(3):1079–1089.
- Sadeghi, H., Jamalpoor, S. et Shirzadi, M. H. 2014. Variability in essential oil of *Teucrium polium* L. of different latitudinal populations. *Industrial Crops and Products*, **54**:130–134.
- Saharkhiz, M. J., Smaeili, S. et Merikhi, M. 2010. Essential oil analysis and phytotoxic activity of two ecotypes of *Zataria multiflora* boiss. growing in Iran. *Natural Product Research*, **24**(17):1598–1609.
- Saiz, H. et Alados, C. L. 2012. Changes in semi-arid plant species associations along a livestock grazing gradient. *PloS one*, **7**(7):e40551.
- Samoylenko, V., Dunbar, D. C., Gafur, M. A., Khan, S. I., Ross, S. A., Mossa, J. S., El-Feraly, F. S., Tekwani, B. L., Bosselaers, J. et Muhammad, I. 2008. Antiparasitic, nematicidal and antifouling constituents from *Juniperus* berries. *Phytotherapy Research*, **22**(12):1570–1576.
- Sarmoum, R., Haid, S., Biche, M., Djazouli, Z., Zebib, B. et Merah, O. 2019. Effect of salinity and water stress on the essential oil components of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.). *Agronomy*, **9**(5):214.

- Scheiter, S. et Higgins, S. I. 2009. Impacts of climate change on the vegetation of Africa : An adaptive dynamic vegetation modelling approach. *Global Change Biology*, **15**(9):2224–2246.
- Schlesinger, W. H., Raikes, J. A., Hartley, A. E. et Cross, A. F. 1996. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, **77**(2):364–374.
- Sharafzadeh, S., Esmaeili, M. et Mohammadi, A. H. 2011. Interaction effects of nitrogen, phosphorus and potassium on growth, essential oil and total phenolic content of sweet basil. *Advances in Environmental Biology*, **5**(6):1285–1290.
- Sharkey, T. D., Wiberley, A. E. et Donohue, A. R. 2008. Isoprene emission from plants : Why and how. *Annals of botany*, **101**(1):5–18.
- Singh, P. K., Verma, N. S., Pandey, N. et Singh, P. 2015. Soil sodicity induced changes in aromatic plants : Effects on growth, water relation, photosynthetic pigments, antioxidative enzymes, cations concentration and quality of *Ocimum sanctum*. *Research Journal of Medicinal Plant*, **9**(8):375–394.
- Sitayayeb, T. et Belabbes, I. 2018. Landscape change in the steppe of Algeria South-West using remote sensing. *Annals of Valahia University of Targoviste, Geographical Series*, **18**(1):41–52.
- Skoula, M., Abidi, C. et Kokkalou, E. 1996. Essential oil variation of *Lavandula stoechas* L. ssp. *stoechas* growing wild in Crete (Greece). *Biochemical Systematics and Ecology*, **24**(3):255–260.
- Smolander, A., Kanerva, S., Adamczyk, B. et Kitunen, V. 2012. Nitrogen transformations in boreal forest soils-does composition of plant secondary compounds give any explanations ?. *Plant and Soil*, **350**(1-2):1–26.
- Stambouli-Meziane, H. et Bouazza, M. 2012. Anthropogenic effects on plant cover in the Tlemcen region (Western Algeria). *Open Journal of Ecology*, **2**(3):141–146.
- Steinbauer, M. J., Field, R., Grytnes, J.-A., Trigas, P., Ah-Peng, C., Attorre, F., Birks, H. J. B., Borges, P. A., Cardoso, P., Chou, C.-H. et al. 2016. Topography-driven isolation, speciation and a global increase of endemism with elevation. *Global Ecology and Biogeography*, **25**(9):1097–1107.

- Steinbauer, M. J., Irl, S. D., González-Mancebo, J. M., Breiner, F. T., Hernández-Hernández, R., Hopfenmüller, S., Kidane, Y., Jentsch, A. et Beierkuhnlein, C. 2017. Plant invasion and speciation along elevational gradients on the oceanic island La Palma, Canary Islands. *Ecology and evolution*, **7**(2):771–779.
- Tétényi, P. 1967. From 'chemo-' to 'chemotaxonomist'. *Taxon*, **16**(3):179–181.
- Thomas, N. et Nigam, S. 2018. Twentieth-century climate change over Africa : Seasonal hydroclimate trends and Sahara desert expansion. *Journal of Climate*, **31**(9):3349–3370.
- Thuiller, W., Lavorel, S. et Araújo, M. B. 2005. Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, **14**(4):347–357.
- Thuiller, W., Midgley, G. F., Hughes, G. O., Bomhard, B., Drew, G., Rutherford, M. C. et Woodward, F. I. 2006. Endemic species and ecosystem sensitivity to climate change in Namibia. *Global Change Biology*, **12**(5):759–776.
- Timmermann, B. N., Luzbetak, D. J., Hoffmann, J. J., Jolad, S. D., Schram, K. H., Bates, R. B. et Klenck, R. E. 1983. Grindelane diterpenoids from *Grindelia camporum* and *Chrysothamnus paniculatus*. *Phytochemistry*, **22**(2):523–525.
- Tirado, R., Bråthen, K. A. et Pugnaire, F. I. 2015. Mutual positive effects between shrubs in an arid ecosystem. *Scientific reports*, **5**:14710.
- Torices, R. et Anderberg, A. A. 2009. Phylogenetic analysis of sexual systems in *Inuleae* (*Asteraceae*). *American Journal of Botany*, **96**(5):1011–1019.
- Tounekti, T., Vadel, A. M., Ennajeh, M., Khemira, H. et Munné-Bosch, S. 2011. Ionic interactions and salinity affect monoterpene and phenolic diterpene composition in rosemary (*Rosmarinus officinalis*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **174**(3):504–514.
- Vaičiulytė, V., Ložienė, K., Taraškevičius, R. et Butkienė, R. 2017. Variation of essential oil composition of *Thymus pulegioides* in relation to soil chemistry. *Industrial Crops and Products*, **95**:422–433.

- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F. *et al.* 2011. The representative concentration pathways : An overview. *Climatic change*, **109**(1-2):5.
- Velikova, V. B. 2008. Isoprene as a tool for plant protection against abiotic stresses. *Journal of Plant Interactions*, **3**(1):1–15.
- Vickers, C. E., Gershenzon, J., Lerdau, M. T. et Loreto, F. 2009. A unified mechanism of action for volatile isoprenoids in plant abiotic stress. *Nature chemical biology*, **5**(5):283–291.
- Waring, B. G., Álvarez-Cansino, L., Barry, K. E., Becklund, K. K., Dale, S., Gei, M. G., Keller, A. B., Lopez, O. R., Markesteijn, L., Mangan, S. *et al.* 2015. Pervasive and strong effects of plants on soil chemistry : A meta-analysis of individual plant 'Zinke' effects. *Proc. R. Soc. B*, **282**(1812):20151001.
- Wiens, J. J. 2004. Speciation and ecology revisited : Phylogenetic niche conservatism and the origin of species. *Evolution*, **58**(1):193–197.
- Wiklund, A. 1986. The genus *Rhanterium* (*Asteraceae* : *Inuleae*). *Botanical journal of the Linnean Society*, **93**(2):231–246.
- Yazaki, K., Arimura, G.-i. et Ohnishi, T. 2017. 'Hidden' terpenoids in plants : Their biosynthesis, localization and ecological roles. *Plant and Cell Physiology*, **58**(10):1615–1621.
- Zahedi, S. M., Karimi, M. et Venditti, A. 2021. Plants adapted to arid areas : specialized metabolites. *Natural Product Research*, **35**(19):3314–3331.
- Zhang, K., Yao, L., Meng, J. et Tao, J. 2018. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. *Science of the Total Environment*, **634**:1326–1334.
- Zhao, X., He, X., Xue, P., Zhang, N., Wu, W., Li, R., Ci, H., Xu, J., Gao, Y. et Zhao, H. 2012. Effects of soil stoichiometry of the CaCO_3 /available phosphorus ratio on plant density in *Artemisia ordosica* communities. *Chinese Science Bulletin*, **57**(5):492–499.

- Zouari-Bouassida, K., Trigui, M., Makni, S., Jlaïel, L. et Tounsi, S. 2018. Seasonal variation in essential oils composition and the biological and pharmaceutical protective effects of *Mentha longifolia* leaves grown in Tunisia. *BioMed research international*, **2018**.
- Zuo, Z., Wang, B., Ying, B., Zhou, L. et Zhang, R. 2017. Monoterpene emissions contribute to thermotolerance in *Cinnamomum camphora*. *Trees*, **31**(6):1759–1771.

Annexes

Huiles essentielles des plantes des zones arides

TABLEAU A.1 – Les composés majoritaires dans les huiles essentielles des plantes des zones arides.

Espèce	Région	Composés majoritaires	Référence
<i>Aaronsohnia pubescens</i> K.Bremer & Humphries	Béchar, Algérie	(Z)- β -Ocimène (53,8 %), β -Myrcène (15,2 %), α -Pinène (7,7 %)	<i>Nat. Prod. Commun.</i> , 2015, 10 (1) :149-151.
<i>Acacia albida</i> Delile	Jos, Nigéria	α -Pinène (18,6 %), β -Pinène (4,5 %), Cyp-rène (4,7 %), α -Terpinéol (3,3 %)	<i>J. Essent. Oil Res.</i> , 2010, 22 (6) :540-542.
<i>Acacia nilotica</i> Linn.	Jos, Nigéria	Menthol (34,9 %), Limonène (15,3 %), Car-vacrol (4,1 %), α -Pinène (3,4 %)	<i>J. Essent. Oil Res.</i> , 2010, 22 (6) :540-542.
<i>Achillea biebersteinii</i> Afan.	Naur, Jordanie	cis-Ascaridole (36,2 %), p-Cymène (31,6 %), Carvénone oxide (6,4 %), Camphor (4,7 %)	<i>Flavour Fragr. J.</i> , 2003, 18 :36-38.
<i>Achillea fragrantissima</i> Sch.Bip.	AlAzraq, Jor-danie	α -Thujone (32,62 %), β -Thujone (24,07 %)	<i>J. Herbs Spices Med. Plants</i> , 2018, 24 (3) :272-281.
<i>Achillea santolina</i> L.	Naur, Jordanie	1,8-Cinéol (17,6 %), Camphor (17,5 %), 4-Terpinéol (7 %), trans-Carvéol (4,8 %)	<i>Flavour Fragr. J.</i> , 2003, 18 :36-38.
<i>Ammodaucus leucotrichus</i> Coss. & Dur.	Ghardaia, Algérie	Terpinolène (69,21 %), Piperitenone (11,99 %), γ -Terpinène (5,01 %)	<i>JBAPN</i> , 2013, 3 (3) :224-231.
<i>Artemisia herba-alba</i> Asso	Kirchaou, Tuni-sie	α -Thujone (44,4 %), β -Thujone (19,5 %), Camphor (4,1 %), trans-Sabinyol acétate (7 %)	<i>Chem. Biodivers.</i> , 2010, 7 :2709-2717.
<i>Artemisia judaica</i> L.	Hoggar, Algé-rie	Pipéritone (66,17 %)	<i>IJB</i> , 2017, 10 (1) :16-23.
<i>Artemisia subdigitata</i> Mattf.	Sharilzh, Mon-golie	Eugénol (11,2 %), méthyl Eugénol (9,4 %), Camphor (9 %), β -Pinène (6,5 %), Limonène (8,1 %), 1,8-Cinéol (5,9 %)	<i>J. Essent. Oil Res.</i> , 2002, 14 :99-100.

<i>Brocchia cinerea</i> (Del.) Batt.	Béchar, Algérie	(E)-Citral (24,01 %), Limonène époxyde cis- (18,26 %), Thymol méthyl éther (15,04 %), Carvacrol (15,03 %), trans-Carvéol (13,79 %)	<i>Asian Pac. J. Trop. Biomed.</i> , 2015, 5 (10) :870-873.
<i>Chrysanthemum trifurcatum</i> Batt.	Zeramidine, Tunisie	Limonène (20,89 %), γ -Terpinène (19,13 %), 1,8-Cinéol (10,64 %), β -Pinène (8,77 %), α -Pinène (5,32 %)	<i>C. R. Chim.</i> , 2008, 11 (3) :324-330.
<i>Croton zambesicus</i> Müll.Arg.	Kordofan, Soudan	1,8-Cinéol (27,07 %), Cymène (13,8 %), α -Terpinéol (6,87 %), α -Pinène (3,79 %)	<i>Asian Pac. J. Trop. med.</i> , 2016, 9 (8) :763-770.
<i>Cymbopogon jwarancusa</i> (Jones) Schult.	Bikaner, Inde	Pipéritone (64,71 %)	<i>J. Essent. Oil Res.</i> , 1993, 5 :639-643.
<i>Cymbopogon jwarancusa</i> ssp. <i>olivieri</i> (Boiss.) Soenarko	Jodhpur, Inde	Géranial (25,47 %), Néral (17,98 %), Géraniol (15,87 %), Géranyl acétate (7,64 %)	<i>J. Essent. Oil Res.</i> , 1993, 5 :639-643.
<i>Cymbopogon schoenanthus</i> (L.) spreng.	Illizi, Algérie	Pipéritone (63,35 %)	<i>J. Med. Plant Res.</i> , 2016, 10 (14) :188-194.
<i>Deverra battandieri</i> (Maire) D.Podlech	Béchar, Algérie	β -Myrcène (8,9 %), α -Phellandrène (17,5 %), α -Terpinène (14 %), O-Cymène (11,6 %)	<i>IJPPR</i> , 2016, 8 (10) :1731-1734.
<i>Deverra chlorantha</i> Coss. & Dur.	Tatouine, Tunisie	α -Pinène (32,5 %), Sabinène (12,6 %), β -Myrcène (4,6 %), β -Phellandrène (13,9 %)	<i>Adv. Biol. Chem.</i> , 2015, 5 (7) :273-278.
<i>Deverra reboudii</i> Coss. & Dur.	Djelfa, Algérie	β -Pinène (37,64 %), α -Pinène (31,77 %), Limonène (7,77 %), p-Cymène (6,02 %)	<i>Phytothérapie</i> , (2018) :1-7.
<i>Deverra scoparia</i> Coss. & Dur.	Saddine, Tunisie	α -Pinène (31,95 %) Sabinène (17,24 %), δ -3-Carène (16,85 %),	<i>J. Econ. Entomol.</i> , 2011, 104 (4) :1220-1228.
<i>Ephedra alata</i> ssp. <i>alenda</i> (Stapf) Trab.	Kebeli, Tunisie	Linalool (19,3 %), 1,8-Cinéol (7,1 %)	<i>J. Essent. Oil-Bear.</i> , 2016, 19 (6) :1503-1509.
<i>Eucalyptus bosistoana</i> F.Müll.	Tamanrasset, Algérie	p-Cymène (39,5 %), Cryptone (15,6 %), 1,8-Cinéol (10,5 %)	<i>Nat. Prod. Commun.</i> , 2014, 9 (5) :701-702.
<i>Francoeuria crispa</i> (Forsk.) Cass.	Montagne d'Elba, Égypte	Carvotanacétone (93 %)	<i>Planta med.</i> , 1997, 63 (5) :479-482.
<i>Haloxylon scoparium</i> Pomel	Tata, Maroc	Carvacrol (82,28 %), p-Cymène (2,52 %), γ -Terpinène (2,18 %)	<i>Afr. J. Complement Altern. Med.</i> , 2019, 16 (2) : 1-14.
<i>Haplophyllum tuberculatum</i> Juss.	Qassim, Arabie saoudite	trans-p-Menth-2-en-1-ol (19,2 %), cis-p-Menth-2-en-1-ol (13,2 %), β -Myrcène (10,1 %), δ -3-Carène (8,8 %), β -Phellandrène (6,9 %)	<i>J. Essent. Oil-Bear.</i> , 2014, 17 (3) :452-459.
<i>Hyoscyamus muticus</i> ssp. <i>fa-lezlez</i> Maire	Adrar, Algérie	Bornéol (76,47 %), Bornyl acétate (4,6 %)	<i>J. Essent. Oil-Bear.</i> , 2017, 20 (5) :1370-1379.
<i>Launaea nudicaulis</i> (L.) Hook.fil.	Al Mudhaibi, Oman	Limonène (18,7 %), (Z)-Citral (22,2%), (E)-Citral (30 %), Géranyl acétate (8,4 %)	<i>IJPSR</i> , 2011, 2 (12) :3166-3169.
<i>Lavandula pubescens</i> Decne.	Imran, Yémen	Carvacrol (72,7 %), Carvacrol méthyl éther (7 %)	<i>J. Essent. Oil-Bear.</i> , 2017, 20 (2) :509-515.
<i>Majorana syriaca</i> (L.) Raf.	Karak, Jordanie	Thymol (70,3 %), p-Cymène (14,5 %), γ -Terpinène (5,6 %)	<i>J. Essent. Oil-Bear.</i> , 2019, 22 (4) :994-1012.
<i>Meriandra bengalensis</i> (J.Koenig ex Roxb.) Benth.	Wesab, Yémen	Camphor (43,6 %), 1,8-Cinéol (10,7 %), Camphène (5,3 %), Bornéol (3,4 %)	<i>Nat. Prod. Commun.</i> , 2012, 7 (8) :1099-1102.
<i>Oudneya africana</i> R.Br.	El Borma, Tunisie	β -Thujone (14,44 %), Camphor (13,90 %), 1,8-Cinéol (9,62 %)	<i>J. Essent. Oil-Bear.</i> , 2018, 21 :4 :1096-1106.

<i>Plectranthus arabicus</i> E.A.Bruce	Jazan, Arabie saoudite	1,8-Cinéol (50,5 %), β -Pinène (7 %), Camphor (6,3 %), β -Myrcène (4,1 %)	<i>J. Saudi Chem. Soc.</i> , 2016, 20 :711-721.
<i>Plectranthus cylindraceus</i> Hochst. ex Benth.	Wesab, Yémen	Thymol (68,5 %), Terpinolène (5,3 %)	<i>Nat. Prod. Commun.</i> , 2012, 7 (8) :1099-1102.
<i>Pulicaria jaubertii</i> Eldin	Jazan, Arabie saoudite	Carvotanacétone (98,59 %)	<i>PhCog. Mag.</i> , 2013, 9 (33) :28-32.
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	Mellab, Maroc	Carvotanacétone (87,3 %)	<i>LWT-Food Sci. Technol.</i> , 2013, 54 (2) :564-569.
<i>Pulicaria undulata</i> (L.) Kostel	EL-Fiteehab, Soudan	Carvotanacétone (55,87 %), β -Linalool (4,55 %)	<i>Ethnobot. Leaflets</i> , 2009, 13 :467-471.
<i>Retama raetam</i> (Forssk.) Webb	Al-Zawia, Libye	β -Linalool (51 %), Limonène (7,4 %), α -Terpinéol (2,3 %)	<i>Nat. Prod. Res.</i> , 2011, 25 (9) :927-933.
<i>Rhanterium adpressum</i> Coss. & Dur.	Ghardaia, Algérie	α -Pinène (11,54 %), β -Myrcène (21,59 %), β -Pinène (13,91 %)	<i>Arch. Microbiol.</i> , 2017, 199 (10) :1345-1356.
<i>Rhanterium epapposum</i> Oliv.	Qassim, Arabie saoudite	Camphène (38,5 %), β -Myrcène (17,5 %), Limonène (10,1 %), α -Pinène (8,7 %)	<i>Saudi Pharm. J.</i> , 2017, 25 (5) :703-708.
<i>Rhanterium suaveolens</i> Desf.	El-Oued, Algérie	Périllaldehyde (45,79 %), β -Pinène (3,21 %)	<i>Nat. Prod. Res.</i> , 2016, 30 (18)2120-2124.
<i>Rumex vesicarius</i> L.	Al-Fayoum, Égypte	Estragole (46,9 %), Anéthole (41,8 %), Fenchone (5,1 %), Limonène (5 %)	<i>Antioxidants</i> , 2013, 2 :167-180.
<i>Salvadora persica</i> L.	Ghour Al-Safi, Jordanie	1,8-Cinéol (46%), β -Pinène (6,3 %)	<i>Pharm. Biol.</i> , 2004, 42 (8) :577-580.
<i>Salvia lanigera</i> Poir.	Rusaifeh, Jordanie	Thymol (54,9 %), méthyl Chavicol (3,5 %), β -Pinène (2,7 %)	<i>Food Chem.</i> , 2007, 100 :732-735.
<i>Salvia syriaca</i> Gouan ex Benth.	Amman, Jordanie	Thymol (15,5 %), Isobornyl acétate (12 %), α -Pinène (12,6 %), Camphène (3,5 %)	<i>Food Chem.</i> , 2007, 100 :732-735.
<i>Suaeda vermiculata</i> J.F.Gmelin	Qassim, Arabie saoudite	Camphor (28,74 %), Bornéol (33,77 %), α -Terpinéol (22,78 %)	<i>J. Essent. Oil-Bear.</i> , 2019, 22 (1) :82-93.
<i>Thamnosma montana</i> Torr. & Frem.	Arizona, USA	β -Phellandrène (42,58 %), Limonène (21,91 %), Sabinène (7,02 %)	<i>J. Essent. Oil Res.</i> , 2005, 17 :366-367.
<i>Thymus algeriensis</i> Boiss. & Reut.	Zintan, Libye	Thymol (38,50 %), p-Cymène (8,91 %), γ -Terpinène (7,19 %), Carvacrol (4,69 %)	<i>Cent. Eur. J. Biol.</i> , 2013, 8 (5) :504-511.
<i>Thymus daenensis</i> ssp. <i>Daenensis</i>	Hamadan, Iran	Thymol (74,7 %), p-Cymène (6,5 %), méthyl Carvacrol (3,6 %)	<i>Food Chem.</i> , 2005, 90 :609-611.
<i>Thymus guyonii</i> de Noé	Laghout, Algérie	Thymol (35,8 %), γ -Terpinène (18,7 %), p-Cymène (15,5 %)	<i>Rev. Agrobio.</i> , 2018, 8 (1) :853-862.
<i>Thymus pallidus</i> Coss. ex Batt.	Ourika, Maroc	Camphor (29,8 %), dihydroCarvone (17,6 %), Bornéol (7,6 %), Camphène (7,5 %).	<i>Nat. Prod. Commun.</i> , 2011, 6 (10) :1507-1510.
<i>Varthemia iphionoides</i> Boiss. & Blanche	Vallé de Jordanie, Jordanie	Bornéol (49,3 %), 1,8-Cinéol (8,4 %), α -Terpinéol (3,8 %), Camphor (3,7 %)	<i>Flavour Fragr. J.</i> , 2004, 19 :559-561.
<i>Xylopi aethiopica</i> (Dunal)A.Rich.	Nuba, Soudan	α -Pinène (11,36 %), α -Phellandrène (10,5 %), β -Phellandrène (8,94 %), γ -Terpinène (3,19 %), 1,8-Cinéol (5,28 %)	<i>Adv. Nat. App. Sci.</i> , 2009, 3 (2) :166-169.
<i>Ziziphora tenuior</i> L.	Tafilah, Jordanie	Pulégone (46,8 %), p-Menth-3-en-8-ol (12,5 %), isoMenthone (6,6 %), 8-hydroxyMenthone (6,2 %)	<i>J. Ethnopharmacol.</i> , 2016, 194 :963-970.

Espèces de la tribu des Inulées étudiées

TABLEAU B.1 – Liste des espèces étudiées avec les coordonnées en degré décimal et les régions d'occurrence en Algérie.

Espèce	Longitude	Latitude	Région
<i>Chiliadenus rupestris</i> (Pomel) S. Brullo	-1.40247	34.89764	Ghar Rouban (Tlemcen)
<i>Chiliadenus rupestris</i> (Pomel) S. Brullo	-1.7816	34.5994	Ghar Rouban (Tlemcen)
<i>Chiliadenus rupestris</i> (Pomel) S. Brullo	-1.72855	34.87675	Maghnia (Tlemcen)
<i>Chiliadenus rupestris</i> (Pomel) S. Brullo	-1.2674	34.89286	Tlemcen
<i>Chiliadenus rupestris</i> (Pomel) S. Brullo	-1.83914	35.08956	Ghazaouet (Tlemcen)
<i>Pulicaria vulgaris</i> Gaertn.	6.73119	35.35747	Aurès (Batna)
<i>Pulicaria vulgaris</i> Gaertn.	3.4522	36.73817	Corso (Boumerdès)
<i>Pulicaria vulgaris</i> ssp. <i>pomeliana</i> (Faure & Maire) E. Gamal-Eldin	2.72894	36.61338	Chaïba (Tipaza)
<i>Pulicaria vulgaris</i> ssp. <i>pomeliana</i> (Faure & Maire) E. Gamal-Eldin	-1.34664	34.78933	Terni (Tlemcen)
<i>Pulicaria filaginoides</i> Pomel	-0.46329	35.70149	Hassi Ameur (Oran)
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	-1.91643	31.96824	Djebel Antar (Béchar)
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	-1.50204	32.09525	Djebel Grouz (Béchar)
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	1.02224	33.72799	Djebel Mekter (Ain sefra)
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	-0.11656	32.77047	Djebel aïssa (Naâma)
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	-0.87994	32.47374	Djebel mzi (Laghouat)
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	-0.43417	32.77896	Tiout (Naâma)
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	-0.61678	32.75719	Ain Safra
<i>Pulicaria odora</i> (L.) Rchb.	5.01627	36.7528	Ain-skhoune (Bejaïa)
<i>Pulicaria odora</i> (L.) Rchb.	4.62741	36.63326	Akfadou (Bejaïa)
<i>Pulicaria odora</i> (L.) Rchb.	1.35694	35.40912	Djebel Saffalou (Tiaret)
<i>Pulicaria odora</i> (L.) Rchb.	4.61342	36.59082	Djenane (Bejaïa)
<i>Pulicaria arabica</i> (L.) Cass.	4.4668	35.68513	M'sila
<i>Pulicaria arabica</i> (L.) Cass.	3.67832	36.70722	Issers (Boumerdès)
<i>Pulicaria sicula</i> (L.) Moris	3.33087	36.75091	Reghaïa (Alger)
<i>Pulicaria sicula</i> (L.) Moris	2.95979	36.52166	Mitidja

<i>Pulicaria sicula</i> (L.) Moris	5.34871	36.32616	djebel Mégriss (Sétif)
<i>Pulicaria sicula</i> (L.) Moris	8.43115	36.86968	Calle
<i>Pulicaria sicula</i> (L.) Moris	6.86997	36.86215	Skikda
<i>Pulicaria sicula</i> (L.) Moris	6.69153	36.37591	Canstantine
<i>Pulicaria sicula</i> (L.) Moris	7.71798	36.92448	Annaba
<i>Pulicaria uniseriata</i> N.Kilian	3.67626	36.68864	Issers (Boumerdès)
<i>Pulicaria uniseriata</i> N.Kilian	4.20169	36.63371	Nath Irathen (Tizi Ouzou)
<i>Pulicaria uniseriata</i> N.Kilian	4.1703	36.37291	El Adjiba (Bouira)
<i>Francoeuria crispa</i> (Forsk.) Cass.	3.70544	32.50244	Anit el Chebrog (Ghardaïa)
<i>Francoeuria crispa</i> (Forsk.) Cass.	4.43676	32.7375	El Guerrara (Ghardaïa)
<i>Francoeuria laciniata</i> Coss. & Dur.	5.76851	34.89652	Biskra
<i>Francoeuria laciniata</i> Coss. & Dur.	3.02982	33.66252	Laghouat
<i>Perralderia coronopifolia</i> Coss.	4.16485	32.17143	Oued Metlili (Ghardaïa)
<i>Perralderia coronopifolia</i> Coss.	3.58789	32.48972	Ghardaïa
<i>Perralderia coronopifolia</i> Coss.	3.77784	32.85029	Berrain (Ghardaïa)
<i>Perralderia coronopifolia</i> Coss.	-3.28989	29.46076	Tabelbala (Béchar)
<i>Perralderia coronopifolia</i> Coss.	7.92904	25.68039	Tassili n'Ajjer (Illizi)
<i>Perralderia coronopifolia</i> ssp. <i>purpurascens</i> (Coss.) Maire	4.15335	32.40309	Zelfana (Ghardaïa)
<i>Perralderia coronopifolia</i> ssp. <i>purpurascens</i> (Coss.) Maire	-0.58867	32.51271	Moghrar-Tahtani (Naâma)
<i>Dittrichia graveolens</i> (L.) W. Greuter	2.97073	36.71823	Alger
<i>Dittrichia viscosa</i> ssp. <i>viscosa</i> (L.) Greuter	-0.49456	35.64217	Oran
<i>Dittrichia viscosa</i> ssp. <i>viscosa</i> (L.) Greuter	3.13029	36.68926	Sidi-Rzine (Alger)
<i>Dittrichia viscosa</i> ssp. <i>viscosa</i> (L.) Greuter	5.49387	36.60043	Taza (Jijel)
<i>Dittrichia viscosa</i> ssp. <i>viscosa</i> (L.) Greuter	-1.39243	34.7389	Forêt d' Hafir (Tlemcen)
<i>Dittrichia viscosa</i> ssp. <i>viscosa</i> (L.) Greuter	-0.54691	32.90369	Ain safra
<i>Inula montana</i> Bal. & Bourg. ex Boiss.	-0.85213	33.03261	Ain safra
<i>Inula montana</i> Bal. & Bourg. ex Boiss.	-1.39346	34.75146	Forêt d' Hafir (Tlemcen)
<i>Inula obtusifolia</i> A. Kerner	8.4702	36.88495	Calle
<i>Inula conyzae</i> (Griess.) DC.	5.62131	36.6666	Selma ben ziada (Jijel)
<i>Limbarda crithmoides</i> ssp. <i>crithmoides</i> (L.) Dumort.	-1.45828	35.28836	Rachgoun (Aïn Témouchent)
<i>Limbarda crithmoides</i> ssp. <i>crithmoides</i> (L.) Dumort.	-1.99217	35.07235	Ouled Ben Ayad (Tlemcen)
<i>Limbarda crithmoides</i> ssp. <i>crithmoides</i> (L.) Dumort.	2.77761	36.67095	Douaouda (Tipaza)
<i>Limbarda crithmoides</i> ssp. <i>crithmoides</i> (L.) Dumort.	-1.38058	35.30673	Beni Saf (Aïn Témouchent)
<i>Limbarda crithmoides</i> ssp. <i>crithmoides</i> (L.) Dumort.	-1.30435	35.28212	Sid Safi (Aïn Témouchent)
<i>Limbarda crithmoides</i> ssp. <i>crithmoides</i> (L.) Dumort.	5.48782	36.59919	Taza (Jijel)
<i>Gymnarrhena micrantha</i> Desf.	3.7096	32.57852	Ghardaïa
<i>Gymnarrhena micrantha</i> Desf.	-2.07659	31.00875	Oued Menouaaraar (Béchar)
<i>Pulicaria crispa</i> (Forsk.) Benth. ex Oliv.	7.94518	25.76873	Tassili n'Ajjer (Illizi)
<i>Pulicaria crispa</i> (Forsk.) Benth. ex Oliv.	5.6123	33.43648	Tougourt (Ouargla)
<i>Pulicaria crispa</i> (Forsk.) Benth. ex Oliv.	-2.08345	31.05934	Oued Menouaaraar (Béchar)
<i>Rhantherium</i> sp. Desf.	5.63427	34.87342	Djebel maaouia (biskra)
<i>Rhantherium adpressum</i> (Desf.) Coss. & Dur.	-0.62553	32.67614	Ain safra
<i>Rhantherium adpressum</i> (Desf.) Coss. & Dur.	3.73201	32.86528	Berraian (Ghardaïa)
<i>Rhantherium adpressum</i> (Desf.) Coss. & Dur.	2.7969	33.65143	Laghouat
<i>Rhantherium</i> sp. Desf.	2.8817	30.5958	Goléa (Ghardaïa)
<i>Rhantherium</i> sp. Desf.	5.3419	31.9628	Ouargla
<i>Rhantherium</i> sp. Desf.	4.2261	32.3961	Zelfana (Ghardaïa)
<i>Asteriscus graveolens</i> (Forssk.) Less.	3.63897	32.47049	Ghardaïa
<i>Asteriscus graveolens</i> (Forssk.) Less.	4.6426	32.7901	Guerrara (Ghardaïa)
<i>Asteriscus graveolens</i> (Forssk.) Less.	9.48721	24.52457	Djanet (Illizi)

<i>Asteriscus graveolens</i> (Forssk.) Less.	5.53505	31.74428	Ouargla
<i>Asteriscus maritimus</i> (L.) Less.	-1.98393	35.07214	Ouled Ben Ayad (Tlemcen)
<i>Asteriscus maritimus</i> (L.) Less.	-1.40241	35.2996	Beni Saf (Aïn Témouchent)
<i>Asteriscus maritimus</i> (L.) Less.	-1.35026	35.2975	Sid Safi (Aïn Témouchent)
<i>Asteriscus maritimus</i> (L.) Less.	-1.35397	34.74313	Forêt d' Hafir (Tlemcen)
<i>Asteriscus aquaticus</i> (L.) Less.	3.58868	36.59207	Lakhdaria (Bouira)
<i>Asteriscus aquaticus</i> (L.) Less.	1.34214	36.10415	Chélif
<i>Asteriscus aquaticus</i> (L.) Less.	2.79375	36.29277	Médéa
<i>Asteriscus aquaticus</i> (L.) Less.	4.89193	36.08251	Bibans (Bordj Bou Arreridj)
<i>Asteriscus pygmaeus</i> (DC.) Coss. & Dur.	3.82333	35.0138	Mergueb (M'sila)
<i>Asteriscus pygmaeus</i> (DC.) Coss. & Dur.	3.67441	32.44019	Ghardaïa
<i>Asteriscus pygmaeus</i> (DC.) Coss. & Dur.	-0.716	33.26763	Aïn Ben-Khellil (Naâma)
<i>Asteriscus pygmaeus</i> (DC.) Coss. & Dur.	-0.75565	32.71382	Ain safra
<i>Anvillea garcinii</i> ssp. <i>radiata</i> (Coss. & Dur.) A. Anderberg	3.517	30.02819	Goléa (Ghardaïa)
<i>Anvillea garcinii</i> ssp. <i>radiata</i> (Coss. & Dur.) A. Anderberg	-0.343	32.4601	Ain Saфра
<i>Anvillea garcinii</i> ssp. <i>radiata</i> (Coss. & Dur.) A. Anderberg	-2.45583	31.91252	Boukaïs (Béchar)
<i>Anvillea garcinii</i> ssp. <i>radiata</i> (Coss. & Dur.) A. Anderberg	-2.2749	31.94516	Lahmar (Béchar)
<i>Anvillea garcinii</i> ssp. <i>radiata</i> (Coss. & Dur.) A. Anderberg	8.31047	26.12683	Tassili n'Ajjer (Illizi)
<i>Pulicaria vulgaris</i> ssp. <i>vulgaris</i> Gaertn.	3.45303	36.74978	Corso (Boumerdès)
<i>Pulicaria vulgaris</i> ssp. <i>vulgaris</i> Gaertn.	3.34246	36.7681	Reghaia (Alger)
<i>Pulicaria clausonis</i> Pomel	2.71375	36.61503	Chaïba (Tipaza)
<i>Pulicaria clausonis</i> Pomel	2.70025	36.63756	Bou Ismaïl (Tipaza)
<i>Pulicaria undulata</i> (L.) C.A.Mey.	9.46086	24.56052	Djanet (Illizi)
<i>Pulicaria undulata</i> (L.) C.A.Mey.	8.04268	26.01828	Tassili n'Ajjer (Illizi)

Analyse du sol

TABLEAU C.1 – Analyse du sol

	Site 01	Site 02	Site 03	Normes des méthodes
PH à 25°C	8.16	8.45	8.31	AFNOR : X 31-103
CE $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C	1853	501	470	ISO : 11265
Salinité mg/l à 20°C	932	240	230	ISO : 11265
Calcaire total %	35	38	40	Volumétrie ISO : 10693
Carbone organique %	-	-	-	Méthode Walkley NF ISO 10694.
Phosphore Total (P) mg/kg	84	71.5	81	Spectrophotométrie EPA 365.2+3 ; APHA4500-P-E DIN EN ISO 6878-D11.
Azote Total (N) mg/kg	150	100	265	Détermination de l'azote total selon Kjeldahl ; Digestion : DIN EN ISO 11905-1 H 36. Détermination : ISO 7890-1 ; DIN 38405 D9.
Potassium (K^+) mg/kg	1125	500	700	Photomètre à Flamme
Nitrate (NO_3^-) mg/kg N	85.1	56.35	59.8	Spectrophotométrie DIN 38405-D9-2
Nitrite (NO_2^-) mg/kg N	0.915	0.96	1.05	Spectrophotométrie DIN EN 26777-D10
Sable grossier %	67.44	75.24	84.08	Granulométrie Méthode des Tamis.
Sable Fin %	17	20	12	
Limon Grossier %	0.58	0.02	0.18	
Limon Fin %	14.48	4.5	2.58	
Argile %	0.5	0.24	0.76	

Relation entre la composition chimique des huiles essentielles et les propriétés du sol

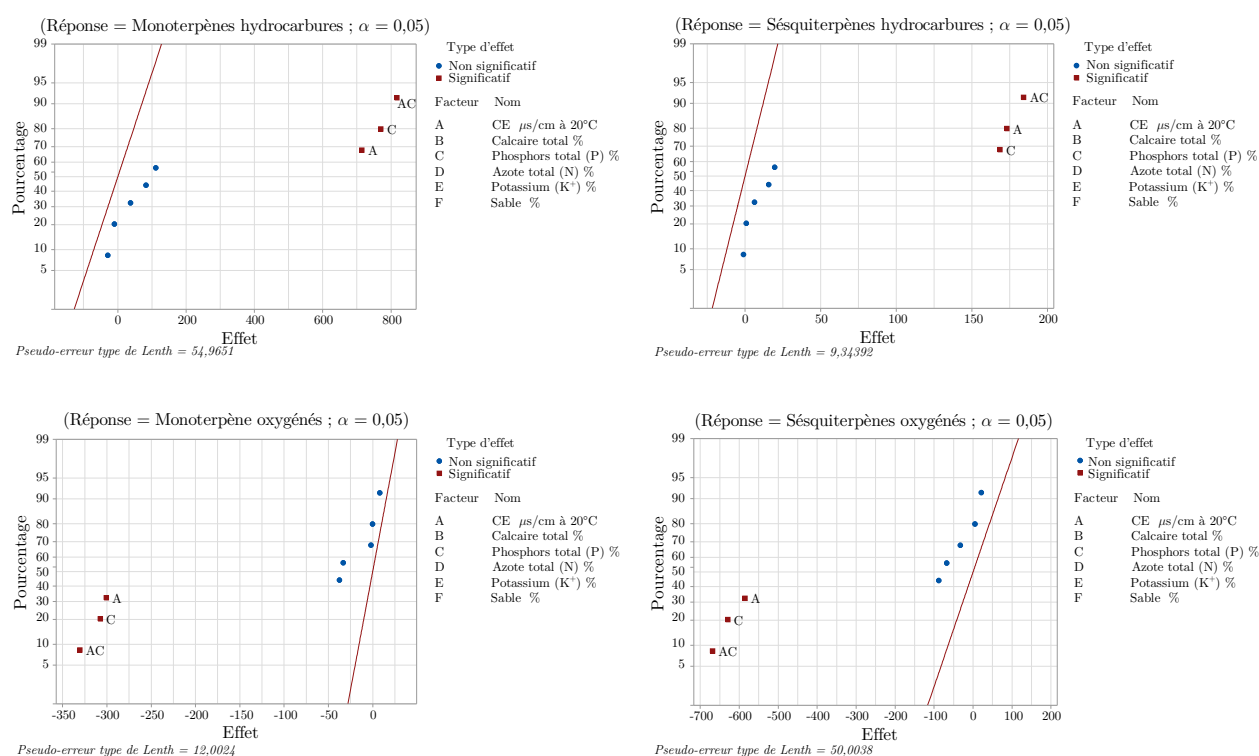


FIGURE D.1 – Droite de Henry des effets des variables de la composition du sol sur la variation des monoterpènes et sésquiterpènes hydrocarbures ou oxygénés.



Données de la deuxième collecte

TABLEAU E.1 – Données de la deuxième collecte de *R. adpressum*

N° d'échantillon	Latitude	Longitude	Teneur (ml/Kg)	Altitude (m)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Hum (%)
Be1	31.742317	-0.834797	20,9	838	19,9	6,4	40,9
Be3	31.253854	-1.959737	20,0	638	21,3	7,5	37,2
Be4	31.219021	-1.972104	16,9	634	21,3	7,5	37,2
Be5	30.981956	-2.134943	18,0	659	22,2	8,2	37,2
Be6	30.982434	-2.135802	19,0	660	22,2	8,2	37,2
Be8	32.064436	-1.142892	14,5	833	18,1	4,9	45,3
Be9	32.062758	-1.146086	14,0	831	18,1	4,9	45,3
Na10	32.234064	-0.969689	17,8	895	18,4	5,1	44,9
Na14	32.339092	-0.867964	14,1	973	18,4	5,1	44,9
Na15	32.342165	-0.864681	14,8	973	18,4	5,1	44,9
La17	33.645558	2.536363	14,0	892	18,0	4,6	46,2
La18	33.861567	2.819367	7,2	805	18,0	4,6	46,2
La19	33.856874	2.814602	8,4	800	18,0	4,6	46,2
La20	33.856334	2.81374	11,5	801	18,0	4,6	46,2
La21	33.911438	2.637211	11,4	909	18,0	4,6	46,2
La22	33.911436	2.636943	14,2	909	18,0	4,6	46,2
La23	33.911599	2.636485	14,5	908	18,0	4,6	46,2
La24	33.911378	2.636108	14,0	909	18,0	4,6	46,2

Sous groupes de β -Pinène/ β -Myrcène

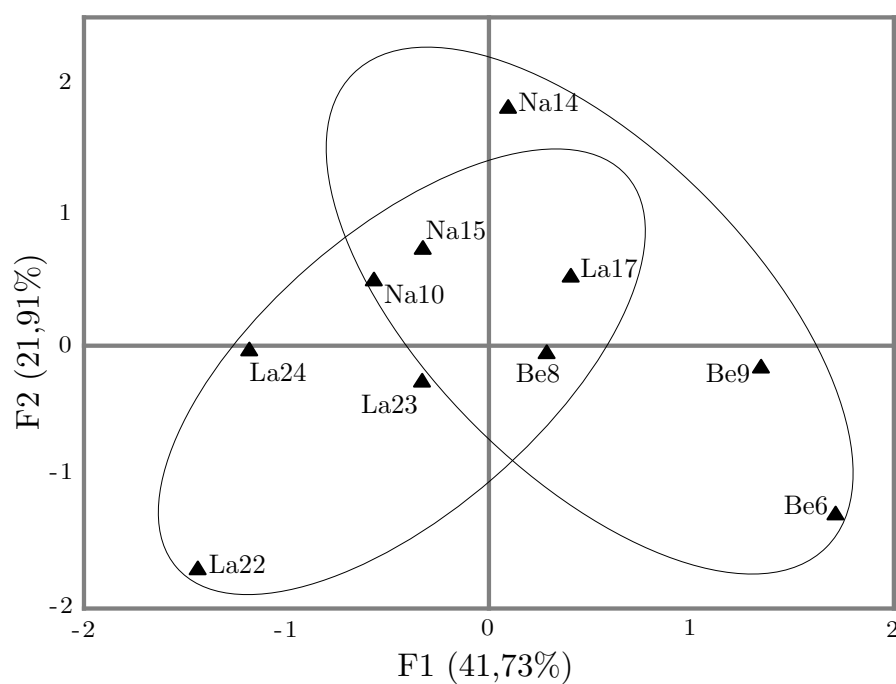


FIGURE F.1 – Graphe des scores d'ACP montrant les sous groupes au sein du groupe β -Pinène/ β -Myrcène.

Sous groupes de β -Myrcène/*p*-Cymène

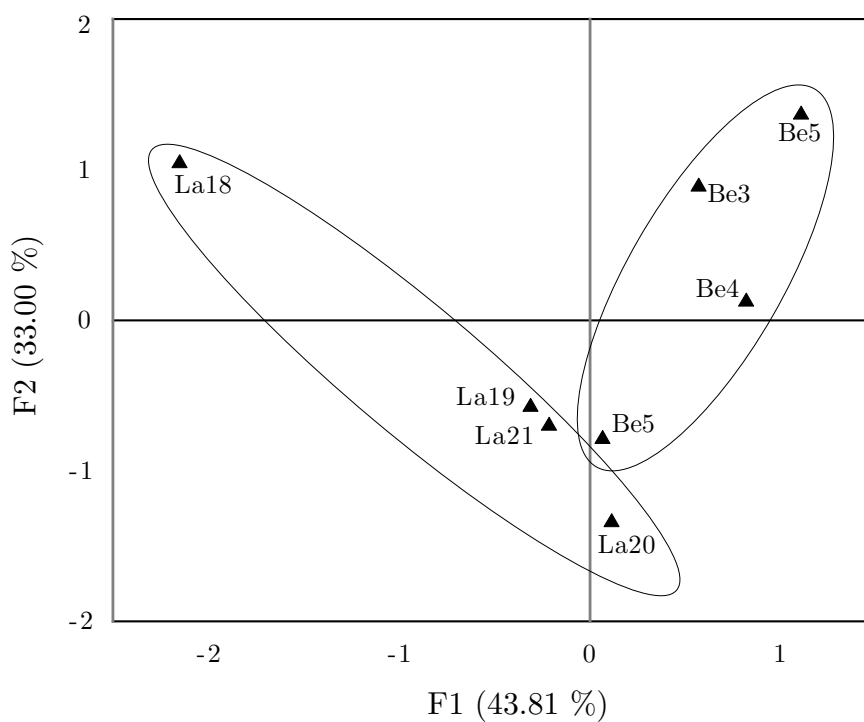


FIGURE G.1 – Graphe des scores d'ACP montrant les sous groupes au sein du groupe β -Myrcène/*p*-Cymène.

Publications

Terpenoids of plants in arid environments

Djilali Tahri*, Fatiha Elhouiti, Mohamed Quinten and Mohamed Yousfi

Address: Laboratory of Fundamental Sciences, University of Amar TELIDJI, P.O. Box: 37G, Road of Ghardaïa, Laghouat 03000, Algeria.

ORCID information: Djilali Tahri (orcid: 0000-0002-9408-6188); Fatiha Elhouiti (orcid: 0000-0001-8191-1428);

Mohamed Quinten (orcid: 0000-0003-3720-7251); Mohamed Yousfi (orcid: 0000-0003-3947-9867)

***Correspondence:** Djilali Tahri. Email: d.tahri@lagh-univ.dz

Received: 28 June 2021

Accepted: 13 November 2021

doi: 10.1079/cabreviews202217001

The electronic version of this article is the definitive one. It is located here: <http://www.cabi.org/cabreviews>

© CAB International 2022 (Online ISSN 1749-8848)

Abstract

Arid and desert environments are characterized by the sparse and discontinuous vegetation cover. Species that have been able to survive difficult bioclimatic conditions and adapt from generation to generation in these areas had to develop physiological and biochemical mechanisms of tolerance and/or resistance. The use of secondary metabolites, specifically terpenoids, is predominant in most of the biotic and abiotic interactions in which these plants are involved. Studies have shown their roles in the prevention of oxidative stress by intervening in thermo-tolerance, water stress, and salt stress generalized in a model of "the protective role of volatile compounds" explained by a single biochemical mechanism. Other studies have proven the functions of terpenoids in direct and indirect defenses against natural enemies, herbivores, and pathogenic microorganisms, in the attraction of pollinators, in competition and facilitation and other interactions between plants. This review mainly summarizes the recent research progress on the adaptation mechanisms of plants in arid environments and the biological and ecological roles of terpenoids in the various biotic and abiotic interactions.

Keywords: essential oil, arid environments, terpenoids, oxidative stress

Review Methodology: The following databases were used for the literature research: Scopus, Web of Science, Google Scholar, Catalogue of Life checklist, International Plant Names Index, Atlas-Sahara, and DataBasin. Keywords used to search for information included essential oil, arid environment, oxidative stress, abscisic acid, monoterpenes, osmolysts, abiotic stresses, and aridity index.

Introduction

Plant life in arid areas is greatly influenced by the severe and hostile ecological conditions. By adapting to these conditions, plants had to develop the physiological and chemical mechanisms to survive and establish communication networks related to daily biotic or abiotic interactions. Arid zones occupy 5.36 million km² or 41% of the earth's land surface and their major characteristics are extreme range in temperature and solar radiation, irregular and low rainfall, high wind speed in summer, sandy soil, and sparse xerophytic and halophytic vegetation [1].

Unlike ephemeral annuals that shorten their life cycles by taking advantage of mild and favorable climate, perennial plants with a longer life cycle are tolerant by forms of physiological adaptation, maintained by genetic and metabolic regulatory pathways depending on microclimate

properties. Therefore, perennial plants ameliorate difficult microclimatic conditions and soil fertility, which makes their sites safe places for the establishment of annuals but within the limits of water availability and tolerable climatic conditions, the relationship between perennials and annuals may become negative [2].

The plant's response to environmental stresses begins with the transmission or transduction of stress signals, perceived at the membrane level, followed by the production of second messengers and transcription factors controlling the expression of genes involved in the stress response, by short- or long-term biochemical or physiological changes. The adaptation of plants to drought causes changes in hormonal balance with increase in the synthesis of abscisic acid, ethylene, and jasmonate and decrease of cytokinin, which also generates an increase in the enzymatic machinery of secondary metabolic products (terpenoids,

steroids, alkaloids, flavonoids, etc.), hydrolytic enzymes, proteinases, and enzymes catalyzing the synthesis of osmolytes [3, 4].

Two distinct synthetic pathways, in plastids and cytoplasm, lead to the production of terpenoids from two inter-convertible C5 units: isopentenyl diphosphate (IPP) and its allelic isomer dimethylallyl diphosphate (DMAPP). The mevalonic acid (MVA) pathway in the cytosol produces sesquiterpenes. The methylerythritol phosphate (MEP) pathway in the plastids is mainly responsible for the biosynthesis of mono- and diterpenes. Terpenoids are molecules based on C5 isoprenic units formed by "head-to-tail" or "head-to-head" addition resulting in hemiterpenes (C5), monoterpenes (C10), sesquiterpenes (C15), diterpenes (C20) including the side chain of chlorophyll, phyloquinones, tocopherol, gibberellins, and phytoalexins, and triterpenes (C30) such as phytosterols, brassinosteroids, and tetraterpenes (C40) which mainly include carotenoids [5, 6].

Monoterpenes and sesquiterpenes are a large class of volatile compounds, involved in several physiological and ecological functions depending on the different expression profiles of terpenes synthases genes. They play important roles in responses to abiotic stresses, such as water stress, salt stress, high temperature, and oxidative stress as they can play beneficial or antagonistic roles in biotic interactions; in the attraction of pollinators, there are the deterrence of pests, direct or indirect defense against herbivorous insects, allelopathy, and other plant-microorganism interactions [7, 8]. The aim of this review was to investigate the characteristics of arid environments and desert plants, forms of biological adaptation, and the importance of terpenoids in biotic and abiotic ecological interactions.

Arid environments and forms of biological adaptation in desert plants

Characteristics of arid environments

Arid environments can be defined by the low and irregular annual precipitation (<250 mm) [9, 10]. Three zones were distinguished: extreme arid (E) less than 60–100 mm, arid (A) between 100 and 150 mm, and semi-arid (S) between 150 and 250 mm. These environments can also be defined by the annual average of the precipitation/potential evapotranspiration ratio p/ETP (aridity index: AI) varying between 0.03 and 0.5 [11], according to which three zones can be classified: hyper-arid (AI: 0.03), arid (AI: 0.03–0.2), and semi-arid (AI: 0.2–0.5). Another definition was made by combining the aridity index and the vegetation index [12]. In this case, four categories can be distinguished: severe deserts (A), semi-arid regions (G), irrigated areas and oases (I), and areas of soil degradation (S).

Arid zones occupy large areas in the northern (between 10° and 50° N) and southern (between 15° and 50° S) hemispheres of the planet (Fig. 1), the largest of which is in Africa (59%) followed by Asia (33%) and Australia is dominated at 82% by these zones that, on the contrary, do not represent more than 20% in the Americas (north or south) [14]. While the public perceives these areas in constant expansion, these systems, in reality, are very dynamic due to the influences of climatic and anthropogenic factors such as precipitation and overgrazing, the fact that the edge of the Sahara between 1980 and 1995 moved in different directions up to 300 km depending on rainfall [15].

All of these areas belong to the group Pedocal, characterized by the existence of calcium carbonate and dominated by

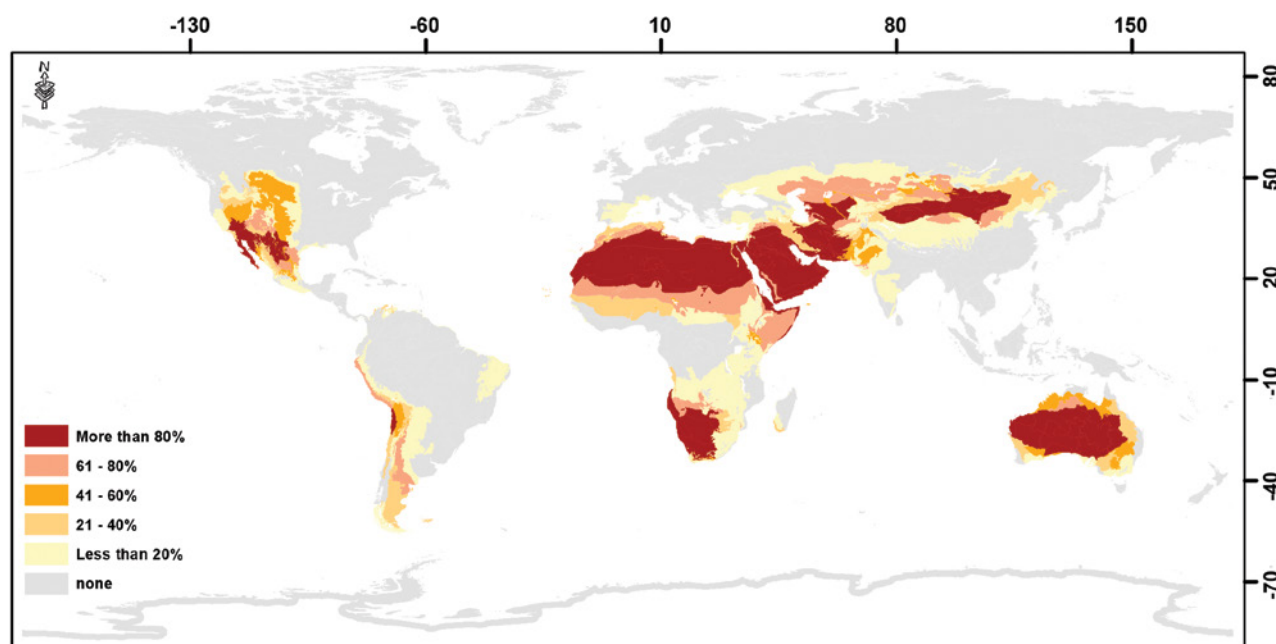


Figure 1. Percentage of arid lands by terrestrial ecoregion [13].

mineral soils (Entisols) with very low concentrations of organic matter and a lack of water (Aridisols). The nature of these soils is influenced by pedogenesis factors and mainly by physical weathering processes of erosion and resedimentation [10, 14].

Most arid lands have an upper crust from which a small amount of precipitations, which is otherwise limited, enters the soil before evaporating. The lower part is called dead horizon since it is almost dry. The low carbon-to-nitrogen ratio is characteristic in these areas, due to lack of formation of humic acid. Arid lands, on the other hand, are rich in clay and often alkaline, because of CaCO_3 ($\text{pH} < 8.4$) or strongly alkaline because of NaCO_3 ($\text{pH} > 8.5$) [10].

In arid and desert areas, precipitation varies considerably between months, seasons, and years with a maximum, usually between 70 and 80 mm, while 50% of continuous low rainfall in these areas has intensity over 20 mm/h and around 20%–30% has intensity of more than 40 mm/h. The part of these precipitations that will evaporate, plus the transpiration of plants, will increase the dryness of those environments. Thereby, like the case of Tehran in Iran, the rate of evapotranspiration is about five times higher than the annual precipitation (1250 mm) and this rate can reach 100 times more in some parts of Asia and Africa [14].

Evapotranspiration increases with frequent and intense winds, which carry large amounts of sand over great distances causing erosion of the soil surface. The temperature in arid areas varies between 30 and 40°C and rises more and more in areas devoid of vegetation. The annual fluctuation remains lower, compared to other areas, but the difference is significant between day and night [1, 10, 14].

Plant adaptations to arid environments

In arid zones, 3/4 of the plants belong to the families of *Poaceae*, *Fabaceae*, and *Asteraceae* which can represent 1/3 of the flora in these zones. Other families such as *Brassicaceae*, *Convolvulaceae*, *Asclepiadaceae*, *Capparaceae*, *Chenopodiaceae*, and *Zygophyllaceae* can be represented in these regions by one or two genera and these last may contain, sometimes, one or two species like the case of *Haloxyylon*, *Traganum*, and *Peganum* [16, 17].

The vegetation covering in the arid and Saharan regions is discontinuous and very irregular, due to the difficult conditions that influence the distribution of plants in their search for water and protection. Therefore, plants have developed the adaptation mechanisms to the arid environments, such as speeding up seed germination taking advantage of low precipitation. Thereby, the seeds of *Anabasis aretioides* start to germinate 10 minutes after and 45 minutes later, the roots will develop and the cotyledons will be capable of photosynthesis [17].

If fast germination does not occur in all cases, the seeds of these plants have a fairly strong longevity, which gives them the ability to germinate in different times that can go up to several years. It should also be noted that the harsh edaphic and climatic conditions affect the development of

new seedlings, because of their low resistance and if they manage to survive, and pass through this period, adaptation mechanisms will be developed during growth [16]. Mechanisms have been developed by these plants to adapt to drought with maximum use of the minimum water in a short life cycle (escape mechanism), or by removing the aerial parts during these periods and keeping underground parts such as rhizomes and bulbs (geophytes: *Drimia noctiflora* (Batt. & Trab.) Stearn and *Androcymbium gramineum* (Cav.) J.F. Macbr.), and in other cases, plants only remove the leaves to reduce transpiration (Fig. 2) [17].

Vegetation in arid areas can be temporal (ephemeral) with annuals or geophytes that appear following rains, and may flower in the presence of only two leaves, then mature seeds within weeks or even days. There are other (perennial) plants that do not reduce their vegetative cycles and prefer other forms of physiological adaptation such as remarkable growth of the root system and reduction of leaf area and the leaves can sometimes be hairy or fleshy with a reduction in the number of stomata [16, 17].

Depending on the season, annual plants can be classified as winter or summer annuals. The physiology differs, for each season, in three main features: leaves, height, and photosynthetic rate. Winter annuals are often shorter and keep their leaves close to the soil surface where the ambient temperature is warmer during the cold winter. Their leaves are also highly dissected to facilitate the passage of CO_2 for photosynthesis. On the other hand, summer annuals are longer and their leaves, displayed along the entire length of the stem, are smaller to reduce transpiration. These leaves maintain solar tracking throughout the day to increase carbon gain [16, 18].

Some annuals, such as *Stipagrostis plumose* Munro ex T. Anderson, *S. ciliata* (Desf.) De Winter, and some *Fagonia* species, can be amphiphytic depending on their bioclimatic conditions. They can, therefore, be annual in extreme conditions and perennial in moderate conditions. The adaptation of desert plants is also shown in propagation strategies, by producing very small and very numerous seeds (escape strategy) as in the case of *Schismus arabicus* Nees and *Spergularia diandra* (Guss.) Heldr., or by covering the seeds with dry material for protection (protection strategy) [15, 18].

At the cellular and molecular levels, the consequences of drought are manifested by a change in the hormonal balance of auxin, gibberellins, and cytokinins and also other mediators of the stress response such as ABA (Abscissic Acid), ethylene, and jasmonate. In general case of drought, the synthesis of ABA increases and that of cytokinins and most proteins decreases with parallel induction of stress protein synthesis. In addition, the activity of certain enzymes such as Rubisco and PEPcase decreases, and that of other enzymes such as α -amylase and proteinases increases. The ABA content also increases in the vicinity of the guard cells, consequently reducing the stomatal conductance [3,4].

Under the influence of abiotic stress, ABA regulates the expression of LEA (late embryogenesis abundant) genes,

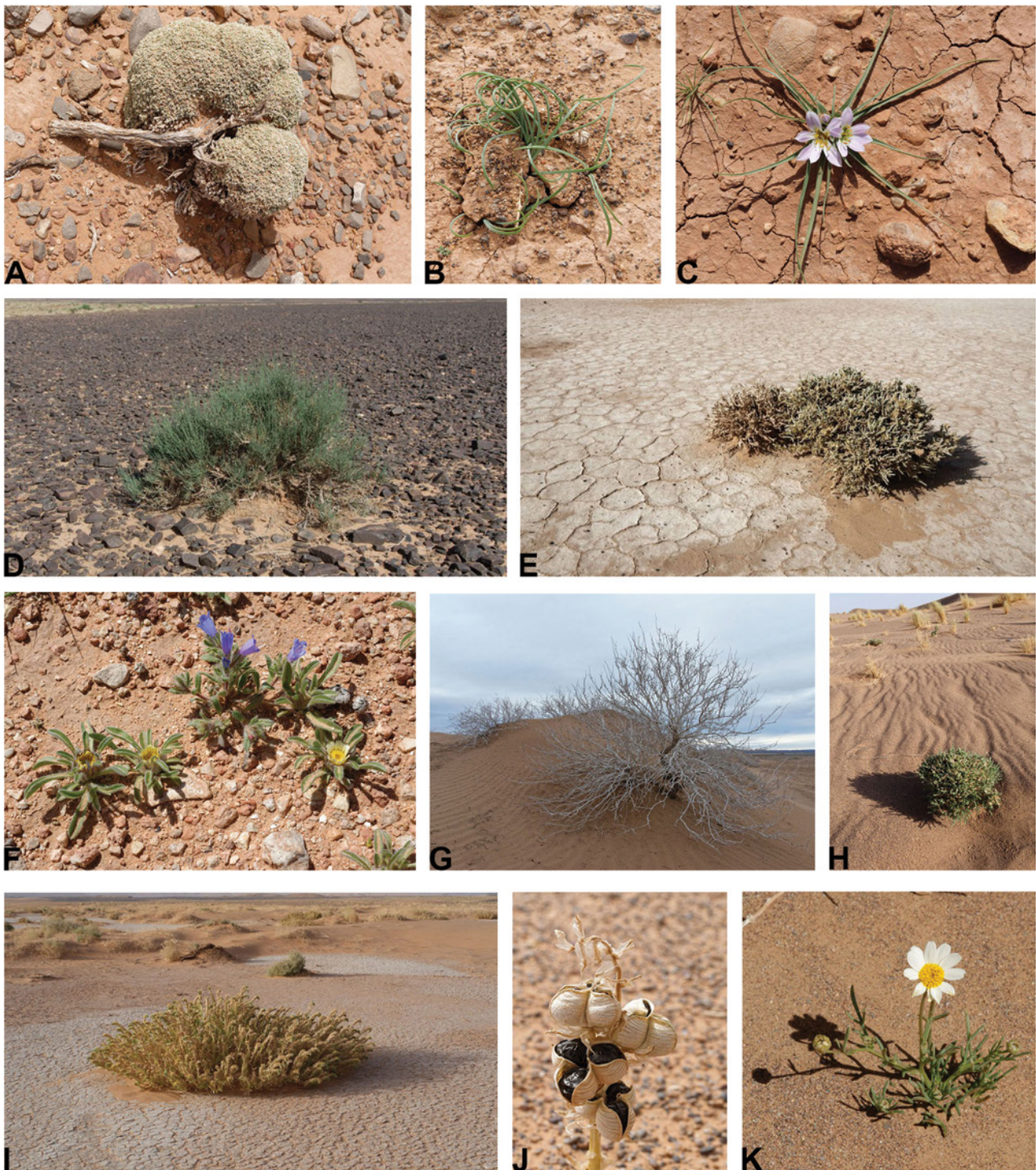


Figure 2. Plants in arid environments. (A) The root of *Anabasis aretioides* Moq. & Coss. that plunges straight into the depths of the ground. (B and C) Germination of *Drimia noctiflora* (Batt. & Trab.) Stearn and *Androcymbium gramineum* (Cav.) J.F.Macbr. (Geophytes), in rainy autumn. (D) *Haloxylon scoparium* Pomel. in desert pavement. (E) *Caroxylon tetrandrum* Akhani & Roalson in salt pan. (F) *Pallenis hierichuntica* Greuter and *Echium trygorrhizum* Pomel just after a good rain. (G) *Calligonum polygonoides* subsp. *Comosum* surrounded by sand dunes. (H) *Cornulaca monacantha* Delile. (I) *Hyoscyamus muticus* subsp. *Falezlez* in salt pan. (J) *Albuca amoena* J.C.Manning & Goldblatt. (K) *Endopappus macrocarpus* Sch. Bip.. Photos credit: © atlas-sahara.org.

revealing a family of LEA proteins very rich in hydrophilic glycine, which play an important role in the protection of cells and are widely distributed in the mitochondria, chloroplasts, and cytoplasm. The expression of other genes

increases to adjust the osmosis of cells by accumulating osmolytes such as proline, glycine, and sucrose. In contrast, expression of the *rbcS* genes of Rubisco and *cab* of proteins associated with chlorophylls a and b decreases [3, 19].

Terpenoids of plants in arid environments

The simulations estimate the current annual global emission (1971–2000) of isoprene and monoterpenes between 400 TgC yr⁻¹ and 30 TgC yr⁻¹, respectively. These emissions in arid zones do not exceed 2 gC m⁻² year⁻¹ for isoprenes and 0.1 gC m⁻² year⁻¹ for monoterpenes [20]. Hydrocarbon

and oxygenated monoterpenes generally characterize the chemical composition of essential oils from arid zone plants by playing an important role in their ecological interactions and their responses to biotic and abiotic stresses (Table 1) [8].

On the other hand, the composition of essential oils of certain species is dominated by sesquiterpenes such as

Table 1. The major compounds in the essential oils of plants in arid environments.

Species	Harvest region	Majority compounds	Reference
<i>Aaronsohnia pubescens</i> K. Bremer & Humphries	Bechar, Algeria	(Z)- β -Ocimene (53.8%), β -Myrcene (15.2%), α -Pinene (7.7%)	Makhloufi et al. [21]
<i>Acacia albida</i> Delile	Jos, Nigeria	α -Pinene (18.6%), β -Pinene (4.5%), Cyperene (4.7%), α -Terpineol (3.3%)	Ogunbinu et al. [22]
<i>Acacia nilotica</i> Linn.	Jos, Nigeria	Menthol (34.9%), Limonene (15.3%), Carvacrol (4.1%), α -Pinene (3.4%)	Ogunbinu et al. [22]
<i>Achillea biebersteinii</i> Afan.	Naur, Jordan	<i>cis</i> -Ascaridole (36.2%), <i>p</i> -Cymene (31.6%), Carvenone oxide (6.4%), Camphor (4.7%)	Bader et al. [23]
<i>Achillea fragrantissima</i> Sch. Bip.	Al-Azraq, Jordan	α -Thujone (32.62%), β -Thujone (24.07%)	Al-Jaber et al. [24]
<i>Achillea santolina</i> L.	Naur, Jordan	1,8-Cineole (17.6%), Camphor (17.5%), 4-Terpineol (7%), <i>trans</i> -Carveol (4.8%)	Bader et al. [23]
<i>Ammodaucus leucotrichus</i> Coss. & Dur.	Ghardaia, Algeria	Terpinolene (69.21%), Piperitenone (11.99%), γ -Terpinene (5.01%)	Abu Zarga et al. [25]
<i>Artemisia herba-alba</i> Asso	Kirchaou, Tunisia	α -Thujone (44.4%), β -Thujone (19.5%), Camphor (4.1%), <i>trans</i> -Sabinyl acetate (7%)	Mighri et al. [26]
<i>Artemisia judaica</i> L.	Hoggar, Algeria	Piperitone (66.17%)	Farah et al. [27]
<i>Artemisia subdigitata</i> Mattf.	Sharilzh, Mongolia	Eugenol (11.2%), methyl Eugenol (9.4%), Camphor (9%), β -Pinene (6.5%), Limonene (8.1%), 1,8-Cineole (5.9%)	Shatar et al. [28]
<i>Brocchia cinerea</i> [Del.] Batt.	Bechar, Algeria	(E)-Citral (24.01%), Limonene epoxide <i>cis</i> - (18.26%), Thymol methyl ether (15.04%), Carvacrol (15.03%), <i>trans</i> -Carveol (13.79%)	Djellouli et al. [29]
<i>Chrysanthemum trifurcatum</i> [Desf.] Batt.	Zeramdine, Tunisia	Limonene (20.89%), γ -TerPinene (19.13%), 1,8-Cineole (10.64%), β -Pinene (8.77%), α -Pinene (5.32%)	Ben Sassi et al. [30]
<i>Croton zambesicus</i> Müll.Arg.	Kordofan, Sudan	1,8-Cineole (27.07%), Cymene (13.8%), α -Terpineol (6.87%), α -Pinene (3.79%)	Yagi et al. [31]
<i>Cymbopogon jwarancusa</i> [Jones] Schult.	Bikaner, India	Piperitone (64.71%)	Shahi and Tava [32]
<i>Cymbopogon jwarancusa</i> ssp. <i>olivieri</i> [Boiss.] Soenarko	Jodhpur, India	Geranial (25.47%), Neral (17.98%), Geraniol (15.87%), Geranyl acetate (7.64%)	Shahi and Tava [32]
<i>Cymbopogon schoenanthus</i> [L.] spreng.	Illizi, Algeria	Piperitone (63.35%)	Hellali et al. [33]
<i>Deverra battandieri</i> [Maire] D.Podlech	Bechar, Algeria	β -Myrcene (8.9%), α -Phellandrene (17.5%), α -Terpinene (14%), O-Cymene (11.6%)	Esseid et al. [34]
<i>Deverra chlorantha</i> Coss. & Dur.	Tatouine, Tunisia	α -Pinene (32.5%), Sabinene (12.6%), β -Myrcene (4.6%), β -Phellandrene (13.9%)	Mighri et al. [35]
<i>Deverra reboudii</i> Coss. & Dur.	Djelfa, Algeria	β -Pinene (37.64%), α -Pinene (31.77%), Limonene (7.77%), <i>p</i> -Cymene (6.02%)	Brahimi et al. [36]
<i>Deverra scoparia</i> Coss. & Dur.	Saddine, Tunisia	α -Pinene (31.95%) Sabinene (17.24%), δ -3-Carene (16.85%)	Attia et al. [37]
<i>Ephedra alata</i> ssp. <i>alenda</i> [Stapf] Trab.	kebeli, Tunisia	Linalool (19.3%), 1,8-Cineole (7.1%)	Jerbi et al. [38]
<i>Eucalyptus bosistoana</i> F.Müll.	Tamanrasset, Algeria	<i>p</i> -Cymene (39.5%), Cryptone (15.6%), 1,8-Cineole (10.5%)	Bouzabata et al. [39]
<i>Francoeuria crispa</i> [Forsk.] Cass.	Elba mountain, Egypte	Carvotanacetone (93%)	Ross et al. [40]

Continued

Table 1. Continued.

Species	Harvest region	Majority compounds	Reference
<i>Haloxylon scoparium</i> Pomel	Tata, Morocco	Carvacrol (82.28%), <i>p</i> -Cymene (2.52%), γ -Terpinene (2.18%)	Drioiche <i>et al.</i> [41]
<i>Haplophyllum tuberculatum</i> Juss.	Qassim, Saudi Arabia	trans- <i>p</i> -Menth-2-en-1-ol (19.2%), <i>cis</i> - <i>p</i> -Menth-2-en-1-ol (13.2%), β -Myrcene (10.1%), δ -3-Carene (8.8%), β -Phellandrene (6.9%)	Al-Rehaily <i>et al.</i> [42]
<i>Hyoscyamus muticus</i> ssp. <i>falezlez</i> [Coss.] Maire	Adrar, Algeria	Borneol (76.47%), Bornyl acetate (4.6%)	Ayari-Guentri <i>et al.</i> [43]
<i>Launaea nudicaulis</i> [L.] Hook.fil.	Al-Mudhaibi, Oman	Limonene (18.7%), (Z)-Citral (22.2%), (E)-Citral (30%), Geranyl acetate (8.4%)	Al-Mahrezi <i>et al.</i> [44]
<i>Lavandula pubescens</i> Decne.	Imran, Yemen	Carvacrol (72.7%), Carvacrol methyl ether (7%)	Al-Badani <i>et al.</i> [45]
<i>Majorana syriaca</i> [L.] Raf.	Hashemya-Karak, Jordan	Thymol (70.3%), <i>p</i> -Cymene (14.5%), γ -Terpinene (5.6%)	Jebarah <i>et al.</i> [46]
<i>Meriandra bengalensis</i> [J.Koenig ex Roxb.] Benth.	Wesab, Yemen	Camphor (43.6%), 1,8-Cineole (10.7%), Camphene (5.3%), Borneol (3.4%)	Awadh Ali <i>et al.</i> [47]
<i>Oudneya africana</i> R.Br.	El Borma, Tunisia	β -Thujone (14.44%), Camphor (13.90%), 1,8-Cineole (9.62%)	El Jery <i>et al.</i> [48]
<i>Plectranthus arabicus</i> E.A.Bruce	Jazan, Saudi Arabia	1,8-Cineole (50.5%), β -Pinene (7%), Camphor (6.3%), β -Myrcene (4.1%)	Khan <i>et al.</i> [49]
<i>Plectranthus cylindraceus</i> Hochst. ex Benth.	Wesab, Yemen	Thymol (68.5%), Terpinolene (5.3%)	Awadh Ali <i>et al.</i> [47]
<i>Pulicaria jaubertii</i> Gamal-Eldin	Jazan, Saudi Arabia	Carvotanacetone (98.59%)	Fawzy <i>et al.</i> [50]
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	Mellab, Morocco	Carvotanacetone (87.3%)	Znini <i>et al.</i> [51]
<i>Pulicaria undulata</i> [L.] Kostel	EL-Fiteehab, Sudan	Carvotanacetone (55.87%), β -Linalool (4.55%)	EL-Kamali <i>et al.</i> [52]
<i>Retama raetam</i> [Forssk.] Webb	Al-Zawia, Libya	β -Linalool (51%), Limonene (7.4%), α -Terpineol (2.3%)	Awen <i>et al.</i> [53]
<i>Rhanterium adpressum</i> Coss. & Dur.	Ghardaia, Algeria	α -Pinene (11.54%), β -Myrcene (21.59%), β -Pinene (13.91%)	Elhouiti <i>et al.</i> [54]
<i>Rhanterium epapposum</i> Oliv.	Qassim, Saudi Arabia	Camphene (38.5%), β -Myrcene (17.5%), Limonene (10.1%), α -Pinene (8.7%)	Demirci <i>et al.</i> [55]
<i>Rhanterium suaveolens</i> Desf.	El-Oued, Algeria	Perillaldehyde (45.79%), β -Pinene (3.21%)	Chemsa <i>et al.</i> [56]
<i>Rumex vesicarius</i> L.	Al-Fayoum, Egypte	Estragole (46.9%), Anethole (41.8%), Fenchone (5.1%), Limonene (5%)	Abou Elfotouh <i>et al.</i> [57]
<i>Salvadora persica</i> L.	Ghour Al-Safi, Jordan	1,8-Cineole (46%), β -Pinene (6.3%)	Alali <i>et al.</i> [58]
<i>Salvia lanigera</i> Poir.	Ar-Rusaifeh, Jordan	Thymol (54.9%), methyl Chavicol (3.5%), β -Pinene (2.7%)	Flamini <i>et al.</i> [59]
<i>Salvia syriaca</i> Gouan ex Benth.	Amman, Jordan	Thymol (15.5%), Isobornyl acetate (12%), α -Pinene (12.6%), Camphene (3.5%)	Flamini <i>et al.</i> [59]
<i>Suaeda vermiculata</i> J.F.Gmelin	Qassim, Saudi Arabia	Camphor (28.74%), Borneol (33.77%), α -Terpineol (22.78%)	Mohammed <i>et al.</i> [60]
<i>Thamnosma montana</i> Torr. & Frem.	Arizona, USA	β -Phellandrene (42.58%), Limonene (21.91%), Sabinene (7.02%)	Tucker <i>et al.</i> [61]
<i>Thymus algeriensis</i> Boiss. & Reut.	Zintan, Libya	Thymol (38.50%), <i>p</i> -Cymene (8.91%), γ -Terpinene (7.19%), Carvacrol (4.69%)	Giwelli <i>et al.</i> [62]
<i>Thymus daenensis</i> ssp. <i>Daenensis</i>	Hamadan, Iran	Thymol (74.7%), <i>p</i> -Cymene (6.5%), methyl Carvacrol (3.6%)	Nickavar <i>et al.</i> [63]
<i>Thymus guyonii</i> de Noé	Laghout, Algeria	Thymol (35.8%), γ -Terpinene (18.7%), <i>p</i> -Cymene (15.5%)	Boulaghmen <i>et al.</i> [64]
<i>Thymus pallidus</i> Coss. ex Batt.	Ourika, Morocco	Camphor (29.8%), dihydro Carvone (17.6%), Borneol (7.6%), Camphene (7.5%)	Ichrak <i>et al.</i> [65]
<i>Varthemia iphionoides</i> Boiss. & Blanche	Jordan Valley, Jordan	Borneol (49.3%), 1,8-Cineole (8.4%), α -Terpineol (3.8%), Camphor (3.7%)	Avato <i>et al.</i> [66]
<i>Xylopi aethiopica</i> [Dunal) A.Rich.	Nuba, Sudan	α -Pinene (11.36%), α -Phellandrene (10.5%), β -Phellandrene (8.94%), γ -Terpinene (3.19%), 1,8-Cineole (5.28%)	EL-Kamali and Adam [67]
<i>Ziziphora tenuior</i> L.	Tafilah, Jordan	Pulegone (46.8%), <i>p</i> -Menth-3-en-8-ol (12.5%), isoMenthone (6.6%), 8-hydroxy-Menthone (6.2%)	Abu-Darwish <i>et al.</i> [68]

Warionia saharae Benth. & Coss. (β -Eudesmol 52.7%) [69], *Trichodesma africanum* (L.) R.Br. (Caryophyllene oxide 15.6%, γ -Eudesmol 13.7% and α -Muurolene 10.5%) [70], *Cyperus conglomeratus* Rottb. (Cyperene 27.2%) [71], *Calligonum azel* Maire (Viridiflorol 14.6% and α -Eudesmol 8.65%) [72], and *Anvillea radiata* Coss. & Dur. (Oxocyclonerolidol 66.6%) [73]. Sometimes monoterpene and sesquiterpene compounds dominate this composition as in the case of *Bubonium graveolens* (Forssk.) Maire (1,8-Cineole 21.5% and δ -Cadinol 19.1%) [74] and *Zilla macroptera* Coss. (Geranyl butyrate 13.52% and Caryophyllene oxide 6.76%) [75].

Plants of arid environments are also a source of complex terpenes, such as diterpenes and triterpenes. For example, several diterpenes, the majorities of which are labdane or grindelane derivatives, have been identified from the dried materials of *Chrysanthamnus* species. Therefore, viscidic acid A and viscidic acid B were isolated from *C. viscidiflorus* (Hook.) Nutt. and for the first time, chrysolic acid and chrysothame were isolated from *C. paniculatus* (A. Gray) H. M. Hall. In addition, two new grindelic acid diterpenoids, 18-hydroxygrindelic and 18-succinyl-oxygrindelic acids, were isolated from *C. nauseosus* Britton & A. Br. [76, 77].

Tetracyclic triterpenes, argentatins A, B, C, and D and isoargentatin B, were abundant in the resin extract of *Parthenium argentatum* $\times$ *P. tomentosa* [78]. However, two new dammarane triterpenes, (3R,20S)-3,20-dihydroxydammar-24-ene and (3R,20S)-3-acetoxy-20-hydroxydammar-24-ene, were isolated from the resin of *Commiphora confuse* Vollesen [79]. The ground plant material of *Cowainia inexciana* was found to be rich in pentacyclic triterpenes such as ursolic, pomolic, 2 α -hydroxyursolic, and 2-epi-tormentic acids [80]. Furthermore, two complex triterpenoid saponins, avicins D and G, were isolated from the seed pods of *Acacia victoriae* Benth. [81].

Protective mechanisms of terpenoids in abiotic and biotic stresses

Terpenoid production in abiotic stress

A positive correlation has been observed between isoprene emission and photosynthesis. Even after saturation of the photosynthetic, processing this emission continues to increase by increasing light intensity and temperature [82]. The production of these molecules is a mechanism, among others, of the thermo-tolerance of plants, providing protection of photosynthetic and respiratory processes by improving membrane stability [83].

The emission of monoterpenes by *Quercus ilex* L. exposed to a temperature range of 30–55°C shows a production threshold of α -pinene, β -pinene, sabinene, myrcene, and limonene reached at 35°C and decreases with increasing temperature, but at 55°C, the emission of myrcene and limonene was higher than at 30°C. On the other hand, the production of *cis*- β -Ocimene and *trans*- β -Ocimene does

not appear to be significantly affected by the increase in temperature [84].

High temperature and excess light can cause oxidative stress due to the accumulation of reactive oxygen compounds such as singlet oxygen ($^1\text{O}_2$), superoxide anion ($\text{O}_2^{\cdot-}$), hydrogen peroxide (H_2O_2), and hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$). Spraying *Cinnamomum camphora* (L.) J. Presl plants with 20 ml of H_2O_2 at 1, 10, or 50 mM increased the emission of monoterpenes and even more oxygenated monoterpenes compared to plants subjected to a temperature of 25–45°C. Whereas in the presence of a monoterpene synthesis inhibitor (a spray of 20 ml with 30 μM of fosmidomycin), the content of $\text{O}_2^{\cdot-}$ and H_2O_2 has undergone an increase of 15% at 45°C and the rate of photosynthesis has decreased by 25% and 63% at 35°C and 45°C, respectively [85]. It has also been shown that the photosynthetic process of plants producing monoterpenes will be much more sensitive in the presence of ozone (O_3) if the emission is inhibited by fosmidomycin [86].

The study of the effect of water stress on *Cistus albidus* L. and *Pinus halepensis* Mill., for 11 days, showed a significantly positive effect on the production of monoterpenes, during the first 7 days, and then a slight decrease when this deficit is severe. In contrast, the emission of monoterpenes by *Rosmarinus officinalis* L. and *Quercus coccifera* L. was not changed during this period compared to the control. The leaves of *C. albidus* and *P. halepensis* contain storage compartments for monoterpenes and their emission has been related to photosynthesis, which will be affected by the long period of drought, due to the fact that in these periods, about 50% of the carbon fixed by photosynthesis is emitted as isoprenes. *R. officinalis* also has these compartments, but it has been suggested that its production of monoterpenes is not completely dependent on photosynthesis. On the other hand, *Q. coccifera* is devoid of these structures, but its ability to retain water for long periods has maintained the production of monoterpenes despite this water stress [87].

Salt stress also affects the production of monoterpenes, and for *R. officinalis*, the percentages of 1,8-cineole and camphor were high after the addition of 100 mM of NaCl, unlike α -terpineol and borneol, which have undergone a slight decrease, but this effect can be changed under the influence of the age of the plants, the duration of the treatment, and the degree of tolerance to salinity [88]. Thus, the percentages of 1,8-cineol, camphor, and borneol increased in the plants of *R. officinalis* irrigated with a solution of 4.2 g of NaCl/l compared to the plants irrigated with tap water, but these percentages are less weak than those in plants under water stress [89].

Depending on the type of soil and the percentages of its nutrients, the emission of monoterpenes by *R. officinalis* and *P. halepensis* was high in calcareous soils and correlated positively with their contents of N, P, K, and Ca^{2+} . Unlike these two species, the monoterpenes of *C. albidus* were higher in siliceous soils and negatively correlated with N and P, which can be interpreted by the involvement of other factors in this emission and the fact that the

dependence on these nutrients can be changed during the phenological cycle [90].

The mechanisms by which monoterpenes exert their protective effect are still undetermined, but the common point between all abiotic stresses is the fact that they cause the generation of dangerous oxidizing species that can react with all biomolecules (through the oxidation of proteins, polyunsaturated fatty acids, and DNA). Vickers *et al.* [86] proposed a model of the protective role of volatile compounds explained by a single biochemical mechanism against several physiological stresses.

This biochemical mechanism explains the direct or indirect protective effect of volatile isoprenoids (VIP) against oxidative damage resulting from abiotic stresses. First, the lipophilic nature of VIPs can reduce oxidative stress and the accumulation of reactive oxygen or nitrogen species ($O_2^{\cdot-}$, H_2O_2 , 1O_2 , $^{\cdot}OH$, O_3 , NO , HNO_3) by stabilizing membranes and consequently minimizing lipid peroxidation. Second, VIPs can interact with these reactive derivatives to produce reactive electrophilic species (methacrolein and methylvinylketone) known as inducers of antioxidant defenses. Third, the direct scavenging of these reactive derivatives prevents their accumulation and hence the resulting oxidative damage.

Oxidative stress caused by environmental stress manifested in the production of reactive oxygen and nitrogen species, which can initiate signal transductions directly or through phytohormones (salicylic acid, ethylene, and jasmonic acid) and cause oxidative damage. Then, the phytohormones trigger cascades of signals leading to programmed cell death via hypersensitivity reactions causing accelerated senescence that result in tissue necrosis. This model of the protective mechanism of VIPs has been well discussed by Vickers *et al.* [86], and the role of reactive oxygen derivatives was detailed by Choudhury *et al.* [91].

Terpenoid production in biotic stress

The roles of terpenoids in the biotic interactions of plants differ between defense, attraction or deterrence in relation to enemy insects, pollinators, and herbivorous animals, and plants in competition or in association. With over 30,000 terpenoids resulting from the activity of terpenes synthases capable of producing up to 50 different compounds from the same substrate and with other secondary metabolites, plants are finding mechanisms to survive this dilemma [92].

Two direct or indirect defense mechanisms are used by plants against herbivorous insects. These insects (*Aphidians*, *Coleoptera*, *Lepidoptera*, etc.) are attracted to host plants by volatile compounds for food or to lay eggs. The adaptation of these insects to terpenoids allowed them to reuse these metabolites as precursors of attraction pheromones between males and females. α -Pinene, limonene, and caryophyllene emitted by the cotton plant attract males of *Anthonomus grandis*, which feed on and re-use these

terpenoids to develop pheromones (grandlures I, II, III, and IV) attractive to their fellows [8].

Plants related to the cotton plant attacked by *A. grandis* increase the levels of glucosinolate and anthocyanin to prepare for direct defense, while the attacked cotton plant perceives the four pheromones and consequently increases the emission of α -pinene, β -myrcene, (E)-ocimene, linalool, (E)-4,8-dimethylnona-1,3,7-triene, (E, E)-4,8,12-trimethyltrideca-1,3,7,11-tetraene, δ -guaiene, and methyl salicylate, compounds which attract *Bracon vulgaris* the natural enemy of *A. grandis*. Thus, female wasps use their venom to paralyze the larvae and stop their development causing their death [93].

The development of aggregating pheromones from monoterpenes has been observed in *Dendroctonus frontalis*, a pine pest that avoids the excessive response of males to Frontalin through the release of verbenone resulting from the conversion of α -pinene. This ability has also been reported for *Ips paraconfusus* with its symbiotic intestinal bacteria *Bacillus cereus*, which produces *cis* and *trans*-verbenols from α -pinene to attract females. For attacked plants, the phenomenon of attraction of enemies of herbivorous insects is an indirect defense discovered 30 years ago and has been studied in more than 15 different plant species [8, 92].

The increased production of monoterpenes can be a direct defense against pathogenic fungi transmitted by insect pests. The attack on *Pinus resinosa* by bark beetles vectors of the fungus *Leptographium terebrantis* was studied by Klepzig *et al.* [94]. Wounds of 12 mm diameter were made to simulate the devastating action and other wounds of the same diameter inoculated with a pure culture of *L. terebrantis*. Concentrations of α -pinene, camphene, β -pinene, 3-carene, myrcene, and limonene were all higher in inoculated wounds than in uninfected wounds and after three weeks of inoculation, these concentrations were even higher. These monoterpenes have shown high biological activity toward those insects and fungi associated with red pine decline disease.

Plants use the thorns, bitterness of alkaloids, and tannins to deter large herbivores and prevent overgrazing. Monoterpenes can play this role despite the fact that herbivores are attracted to the scent. The lipophilic nature of these compounds makes them poorly excreted in urine or bile unlike polar compounds. These molecules will therefore be reabsorbed and undergo functionalization or conjugation processes with enzymes such as cytochromes P450 and glucuronosyltransferase in the liver or the digestive tract. Functionalization consists of adding R-H or ROH functional groups, while conjugation involves the direct addition of endogenous molecules such as glucuronide and glutathione to increase the polarity [95].

Despite this defensive action, plants can take advantage of herbivores for pollination and seed dispersal and can also use terpenoids such as β -ocimene, considered to be a universal attractant to attract bees, flies, bats, moths, birds, and ants (pollination of *Retama sphaerocarpa* and *Frankenia thymifolia* by *Camponotus foreli*). The attraction potential of

some other compounds has been proven, 1,8-cineol for *Bombus terrestris*, linalool, and (E, E)- α -farnesene for some *Andrena* and Bicyclogermacrene for some *Diptera* [96–98].

Between competition and facilitation, studies suggest that herbivory and non-excessive abiotic stresses positively affect the interaction between coexisting species. Facilitating interaction is common in arid environments and often observed in plant associations typically represented by perennial plants [99]. On the other hand, observations in arid ecosystems show an allelopathic potential of perennial adults of the *Asteraceae* and *Lamiaceae* families capable of inhibiting germination and reducing the growth of various annual plants [100].

During the summer, *Salvia leucophylla* and *Artemisia californica*, which dominate semi-arid southern California, mainly produce camphor and 1,8-cineol, which, will be absorbed by the soil, inhibit germination of other plants the following spring. It is only after the bushfires, resulting from the saturation of the air with flammable compounds, that these phytotoxins will be destroyed and annual plants can reappear [8].

The allelopathy effect of *Origanum dayi*, *Artemisia sieberi*, and *Artemisia judaica* was related, respectively, to the presence of high percentages in air and soil of 1,8-cineol (39.2%–49% and 21.5%–38.7%), α -pinene (8.8%–9.1% and 7.7%–18.3%), and camphor (2.1%–4.8% and 7.4%–8.9%) [101]. The essential oils of two ecotypes (from Lamerd and Zarghan regions in Iran) of *Zataria multiflora*, dominated by carvacrol and linalool (77.4% and 90.6%, respectively), exerted a significant inhibitory effect at concentrations of 320 and 640 μ l/l on the germination of seeds of *Hordeum spontaneum*, *Secale cereale*, *Amaranthus retroflexus*, and *Cynodon dactylon* [102].

Terpenoids are also involved in interactions with microorganisms and other aggressors. Several *in vitro* studies have shown their antibacterial [38, 48], antifungal [21, 54], acaricidal [37], nematicidal [103], and insect repellent powers [55], while other studies have found that the presence of monoterpenes such as α -pinene, β -pinene, δ -3-carene, myrcene, limonene, and α -Phellandrene in soil inhibits net mineralization of N and net nitrification by inhibition of the growth of responsible microbes, such as species of the genera *Nitrosospira*, *Nitrosomonas*, and *Nitrosococcus* [104].

Conclusion

Arid environments constitute a natural laboratory for biologists and evolutionists. It is through their bioclimatic conditions that natural selection is exposed at its extreme. Plants in these environments have developed several forms of physiological and molecular adaptation, in response to different bio-ecological interactions in their habitats. The chemistry of these plants, in their adaptation, is manifested by the synthesis of various natural products belonging to different families of secondary metabolites.

Essential oils of plants in arid environments play important biological and ecological roles, ranging from protection against abiotic stresses to defense and biotic interactions. The monoterpene class is mainly involved in most of these roles and contributes significantly to the ecological chemistry of these plants. Many studies have focused on the biological potential of these terpenoids, by experiments of antimicrobial effects or allelopathy effect, but few studies have initiated *in situ* work on the functions of defense, association, or on other biotic interactions within desert plant groups. The results of such studies and future studies will be very interesting and will contribute to the understanding of the ecological chemistry of plants in arid environments.

References

1. Gaur MK, Squires VR. Geographic extent and characteristics of the world's arid zones and their peoples. In: Climate variability impacts on land use and livelihoods in drylands. Cham: Springer; 2018. p. 3–20.
2. Luzuriaga AL, Sánchez AM, Maestre FT, Escudero A. Assemblage of a semi-arid annual plant community: Abiotic and biotic filters act hierarchically. *PLoS One* 2012;7(7):e41270.
3. Calatayud PA, Garrec JP, Nicole M. Adaptation des plantes aux stress environnementaux. In: Interactions insectes-plantes. Versailles, France: Editions Quae. 2013. p. 229–45.
4. Abobatta WF. Drought adaptive mechanisms of plants—A review. *Advances in Agriculture and Environmental Science* 2019;2(1):2–65.
5. Rodríguez-Concepción M, Boronat A. Elucidation of the methylerythritol phosphate pathway for isoprenoid biosynthesis in bacteria and plastids. A metabolic milestone achieved through genomics. *Plant Physiology* 2002;130(3):1079–89.
6. Zahedi SM, Karimi M, Venditti A. Plants adapted to arid areas: Specialized metabolites. *Natural Product Research* 2019;35(19):3314–31.
7. Abbas F, Ke Y, Yu R, Yue Y, Amanullah S, Jahangir MM, et al. Volatile terpenoids: Multiple functions, biosynthesis, modulation and manipulation by genetic engineering. *Planta* 2017;246(5):803–16.
8. Mann J. Secondary metabolism. Oxford, England: Oxford University Press; 1987.
9. Noy-Meir I. Desert ecosystems: Environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics* 1973;4(1):25–51.
10. Jafari M, Tavili A, Panahi F, Esfahan EZ, Ghorbani M. Characteristics of arid and desert ecosystems. In: Reclamation of Arid Lands. Cham, Switzerland: Springer. 2018. p. 21–91.
11. Dietz T, Veldhuizen E. The world's drylands: A classification. In: The impact of climate change on drylands. Dordrecht, Netherlands: Springer; 2004. p. 19–26.
12. Gamo M, Shinoda M, Maeda T. Classification of arid lands, including soil degradation and irrigated areas, based on vegetation and aridity indices. *International Journal of Remote Sensing* 2013;34(19):6701–22.
13. Hoekstra JM, Molnar JL, Jennings M, Revenga C, Spaulding M, et al. The atlas of global conservation. Vol. 67. Berkeley, CA: University of California Press; 2010.

14. Dregne HE. Soils of arid regions. Vol. 6. Amsterdam, Netherlands: Elsevier; 1976.
15. McNeely J. Biodiversity in arid regions: Values and perceptions. *Journal of Arid Environments* 2003;54(1):61–70.
16. Ozenda P. Flore et végétation du Sahara. 3rd ed. Paris, France: CNRS Editions; 2004.
17. Brown GW. Desert biology: Special topics on the physical and biological aspects of arid regions. Vol. 11. New York, USA: Academic Press, Inc; 1974.
18. Ward D. Morphological and physiological adaptations of desert plants to the abiotic environment. In: *The biology of deserts*. Oxford, England: Oxford University Press. 2016. p. 29–65.
19. Chen Y, Li C, Zhang B, Yi J, Yang Y, Kong C, et al. The role of the late embryogenesis-abundant (Lea) protein family in development and the abiotic stress response: A comprehensive expression analysis of potato (*Solanum Tuberosum*). *Genes* 2019;10(2):148.
20. Hantson S, Knorr W, Schurgers G, Pugh TA, Arneth A. Global isoprene and monoterpene emissions under changing climate, vegetation, CO₂ and land use. *Atmospheric Environment* 2017;155:35–45.
21. Makhoulfi A, Larbi LB, Moussaoui A, Lazouni HA, Romane A, Wanner J, et al. Chemical composition and antifungal activity of *Aaronsohnia pubescens* essential oil from Algeria. *Natural Product Communications* 2015;10(1):149–51.
22. Ogunbinu AO, Okeniyi S, Flamini G, Cioni PL, Ogunwande IA, Babalola IT. Essential oil composition of *Acacia nilotica* Linn., and *Acacia albida* Delile (Leguminosae) from Nigeria. *Journal of Essential Oil Research* 2010;22(6):540–42.
23. Bader A, Flamini G, Cioni PL, Morelli I. Essential oil composition of *Achillea santolina* L. and *Achillea biebersteinii* Afan. collected in Jordan. *Flavour and Fragrance Journal* 2003;18(1):36–8.
24. Al-Jaber HI, Abu Zarga MH, Al-Aboudi AF, Al-Qudah MA, Al-Shawabkeh AF, Abaza IF, et al. Essential oil composition and anticholinesterase activity evaluation of *Achillea fragrantissima* growing wild in Jordan. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants* 2018;24(3):272–81.
25. Abu Zarga MH, Al-Jaber HI, Baba Amer ZY, Sakhril L, Al-Qudah MA, Al-humaidi JY, et al. Chemical composition, antimicrobial and antitumor activities of essential oil of *Ammodaucus leucotrichus* growing in Algeria. *Journal of Biologically Active Products from Nature* 2013;3(3):224–31.
26. Mighri H, Akrouit A, El-jeni H, Zaidi S, Tomi F, Casanova J, et al. Composition and intraspecific chemical variability of the essential oil from *Artemisia herba-alba* growing wild in a Tunisian arid zone. *Chemistry & Biodiversity* 2010;7(11):2709–17.
27. Farah R, El Ouassiss Dahmane HM, Rym E, Amira S, el Houda HN, Selma BA, Nadia F. Chemical composition and biological effects of essential oil of *Artemisia judaica* an endemic plant from central Sahara of Algeria Hoggar. *International Journal of Biosciences* 2017;10(1):16–23.
28. Shatar S, Altantsetseg S, Dung NX, Ngoc PH, Klinkby N, Leclercq PA. The essential oil of *Artemisia subdigitata* Mattf. from mongolian the Desert-Gobi. *Journal of Essential oil Research* 2002;14(2):99–100.
29. Djellouli M, Benmehdi H, Mammeri S, Moussaoui A, Ziane L, Hamidi N. Chemical constituents in the essential oil of the endemic plant *Cotula cinerea* (Del.) from the southwest of Algeria. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine* 2015;5(10):870–73.
30. Ben Sassi A, Harzallah-Skhiri F, Chraief I, Bourougnon N, Hammami M, Aouni M. Chemical composition and antimicrobial activities of the essential oil of (Tunisian) *Chrysanthemum trifurcatum* (Desf.) Batt. and Trab. flowerheads. *Comptes Rendus Chimie* 2008;11(3):324–30.
31. Yagi S, Babiker R, Tzanova T, Schohn H. Chemical composition, antiproliferative, antioxidant and antibacterial activities of essential oils from aromatic plants growing in Sudan. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine* 2016;9(8):763–70.
32. Shahi AK, Tava A. Essential oil composition of three *Cymbopogon* species of Indian Thar Desert. *Journal of Essential Oil Research* 1993;5(6):639–43.
33. Hellali N, Mahammed MH, Ramdane F, Talli A. Antimicrobial and antioxidant activities of *Cymbopogon schoenanthus* (L.) spreng. essential oil, growing in Illizi-Algeria. *Journal of Medicinal Plants Research* 2016;10(14):188–94.
34. Esseid C, Mechehoud Y, Chalchat JC, Figueredo G, Chalard P, Benayache S, et al. Chemical composition of the essential oil of aerial parts of *Pituranthos battandieri* Maire. *International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research* 2016;8:1731–734.
35. Mighri H, Sabri K, Eljeni H, Neffati M, Akrouit A. Chemical Composition and Antimicrobial Activity of *Pituranthos chloranthus* (Benth.) Hook and *Pituranthos tortuosus* (Coss.) Maire essential oils from Southern Tunisia. *Advances in Biological Chemistry* 2015;5(7):273.
36. Brahimi S, Dahia M, Azouzi B, Nasri M, Laouer H. Composition chimique et activité antimicrobienne de l'huile essentielle de *Deverra reboudii* (Coss. & Durieu). *Phytothérapie* 2018;18(5):314–20.
37. Attia S, Grissa KL, Lognay G, Heuskin S, Mailleux AC, Hance T. Chemical composition and acaricidal properties of *Deverra scoparia* essential oil (*Araliales: Apiaceae*) and blends of its major constituents against *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). *Journal of Economic Entomology* 2011;104(4):1220–28.
38. Jerbi A, Zehri S, Abdnnabi R, Gharsallah N, Kammoun M. Essential oil composition, free-radical-scavenging and antibacterial effect from stems of *Ephedra alata alenda* in Tunisia. *Journal of Essential Oil Bearing Plants* 2016;19(6):1503–9.
39. Bouzabata A, Bighelli A, Abed L, Casanova J, Tomi F. Composition and chemical variability of *Eucalyptus bosistoana* essential oil from Algerian Sahara. *Natural Product Communications* 2014;9(5):701–2.
40. Ross SA, El Sayed KA, El Sohly MA, Hamann MT, Abdel-Halim OB, Ahmed AF, et al. Phytochemical analysis of *Geigeria alata* and *Francoeuria crispa* essential oils. *Planta Medica* 1997;63(5):479–82.
41. Drioichea A, Benhlina N, Kharchoufa S, El-Makhoukhi F, Mehanned S, Adadi I, et al. Antimicrobial and antiradical properties of *Hammada scoparia* (Pomel) Ilijin. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines* 2019;16(2):1–14.
42. Al-Rehaily AJ, Alqasoumi SI, Yusufoglu HS, Al-Yahya MA, Demirci B, Tabanca N, et al. Chemical composition and biological activity of *Haplophyllum tuberculatum* Juss. essential oil. *Journal of Essential Oil Bearing Plants* 2014;17(3):452–59.

43. Ayari-Guentri S, Djemouai N, Gaceb-Terrak R, Rahmania F. Chemical composition and antioxidant activity of *Hyoscyamus muticus* L. subsp. *falezlez* (Coss.) Maire from Algeria. *Journal of Essential Oil Bearing Plants* 2017;20(5):1370–9.
44. Al-Mahrezi JA, Al-Sabahi JN, Akhtar MS, Selim D, Weli AM. Essential oil composition and antimicrobial screening of *Launaea nudicaulis* grown in Oman. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research* 2011;2(12):3166–9.
45. Al-Badani RN, da Silva JKR, Mansi I, Muharam BA, Setzer WN, Awadh Ali NA. Chemical composition and biological activity of *Lavandula pubescens* essential oil from Yemen. *Journal of Essential Oil Bearing Plants* 2017;20(2):509–15.
46. Jebarah R, Hudaib M, Bustanji Y, Al-Abbassi R, Alhourani N, Kasabri V. Essential oil composition and antiproliferative potential of the aerial parts of *Majorana syriaca* (L. Rafi): An aromatic essential oil bearing ethnomedicinal herb from Jordan. *Journal of Essential Oil Bearing Plants* 2019;22(4):994–1012.
47. Ali NAA, Wurster M, Denkert A, Arnold N, Fadail I, Al-Didamony G, et al. Chemical composition, antimicrobial, antioxidant and cytotoxic activity of essential oils of *Plectranthus cylindraceus* and *Meriandra benghalensis* from Yemen. *Natural Product Communications* 2012;7(8):1099–102.
48. El Jery A, Bouabid F, Rashid MM. Study of chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of *Oudneya africana* oils from stems, leaves, and flowers. *Journal of Essential Oil Bearing Plants* 2018;21(4):1096–106.
49. Khan M, Al-Saleem MS, Alkathlan HZ. A detailed study on chemical characterization of essential oil components of two *Plectranthus* species grown in Saudi Arabia. *Journal of Saudi Chemical Society* 2016;20(6):711–21.
50. Fawzy GA, Al Ati HY, El Gamal AA. Chemical composition and biological evaluation of essential oils of *Pulicaria jaubertii*. *Pharmacognosy Magazine* 2013;9(33):28–32.
51. Znini M, Cristofari G, Majidi L, Paolini J, Desjobert JM, Costa J. Essential oil composition and antifungal activity of *Pulicaria mauritanica* Coss., against postharvest phytopathogenic fungi in apples. *LWT-Food Science and Technology* 2013;54(2):564–9.
52. El-Kamali HH, Yousif MO, Ahmed OI, Sabir SS. Phytochemical analysis of the essential oil from aerial parts of *Pulicaria undulata* (L.) Kostel from Sudan. *Ethnobotanical Leaflets* 2009;13:467–71.
53. Awen BZS, Unnithan CR, Ravi S, Kermagy A, Sasikumar JM, Khrbash AS, et al. Essential oils of *Retama raetam* from Libya: Chemical composition and antimicrobial activity. *Natural Product Research* 2011;25(9):927–33.
54. Elhouiti F, Tahri D, Takhi D, Ouinten M, Barreau C, Verdal-Bonnin MN, et al. Variability of composition and effects of essential oils from *Rhanterium adpressum* Coss. & Durieu against mycotoxinogenic *Fusarium* strains. *Archives of Microbiology* 2017;199(10):1345–56.
55. Demirci B, Yusufoglu HS, Tabanca N, Temel HE, Bernier UR, Agramonte NM, et al. *Rhanterium epapposum* Oliv. essential oil: Chemical composition and antimicrobial, insect-repellent and anticholinesterase activities. *Saudi Pharmaceutical Journal* 2017;25(5):703–8.
56. Chems A, Erol E, Öztürk M, Zellagui A, Özgür C, Gherraf N, et al. Chemical constituents of essential oil of endemic *Rhanterium suaveolens* Desf. growing in Algerian Sahara with antibiofilm, antioxidant and anticholinesterase activities. *Natural Product Research* 2016;30(18):2120–4.
57. Abou Elfetoh MA, Shams KA, Anthony KP, Shahat AA, Ibrahim MT, Abdelhady NM, et al. Lipophilic constituents of *Rumex vesicarius* L. and *Rumex dentatus* L. *Antioxidants* 2013;2(3):167–80.
58. Alali F, Hudaib M, Aburjai T, Khairallah K, Al-Hadidi N. GC-MS analysis and antimicrobial activity of the essential oil from the stem of the Jordanian toothbrush tree *Salvadora persica*. *Pharmaceutical Biology* 2005;42(8):577–80.
59. Flamini G, Cioni PL, Morelli I, Bader A. Essential oils of the aerial parts of three *Salvia* species from Jordan: *Salvia lanigera*, *S. spinosa* and *S. syriaca*. *Food Chemistry* 2007;100(2):732–5.
60. Mohammed HA, Al-Omar MS, Aly MS, Hegazy MM. Essential oil constituents and biological activities of the halophytic plants, *Suaeda vermiculata* Forssk and *Salsola cyclophylla* Bakera growing in Saudi Arabia. *Journal of Essential Oil Bearing Plants* 2019;22(1):82–93.
61. Tucker AO, Maciarello MJ, Landrum LR. The essential oil of Mojave Desert rue, *Thamnosma montana* Torr. et Frém. (*Rutaceae*), from Arizona. *Journal of Essential Oil Research* 2005;17(4):366–7.
62. Giweli AA, Džamić AM, Soković MD, Ristić MS, Marin PD. Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of essential oil of *Thymus algeriensis* wild-growing in Libya. *Central European Journal of Biology* 2013;8(5):504–11.
63. Nickavar B, Mojab F, Dolat-Abadi R. Analysis of the essential oils of two *Thymus* species from Iran. *Food Chemistry* 2005;90(4):609–11.
64. Boulaghmen F, Chaouia C, Hazzit M, Nouas M, Saidi F. Composition chimique et activité antimicrobienne d'huile essentielle extraite de *Thymus guyonii* de Noe d'Aflou – Algérie. *Revue Agrobiologia* 2018;8(1):853–62.
65. Ichrak G, Rim B, Loubna AS, Khalid O, Abderrahmane R, Said EM. Chemical composition, antibacterial and antioxidant activities of the essential oils from *Thymus satureioides* and *Thymus pallidus*. *Natural Product Communications* 2011;6(10):1507–10.
66. Avato P, Raffo F, Aldouri NA, Vartanian ST. Essential oils of *Varthemia iphionoides* from Jordan. *Flavour and Fragrance Journal* 2004;19(6):559–61.
67. El-Kamali HH, Adam HO. Aromatic plants from the Sudan: Part II. Chemical composition of the essential oil of *Xylopia aethiopica* (Dunal) A. Rich.–Existence of chemotype species. *Advances in Natural and Applied Sciences* 2009;3(2):166–70.
68. Abu-Darwish MS, Cabral C, Gonçalves MJ, Cavaleiro C, Cruz MT, Paoli M, Tomi T, Salgueiro L. *Ziziphora tenuior* L. essential oil from Dana Biosphere Reserve (Southern Jordan); chemical characterization and assessment of biological activities. *Journal of Ethnopharmacology* 2016;194:963–70.
69. Essaqui A, Elamrani A, Cayuela JA, Benaissa M. Chemical composition of the essential oil of *Warionia saharae* from Morocco. *Journal of Essential Oil Bearing Plants* 2007;10(3):241–6.
70. Ahmed S, Ibrahim M, Khalid K. Investigation of essential oil constituents isolated from *Trichodesma africanum* (L.) grow wild in Egypt. *Research Journal of Medicinal Plant* 2015;9(5):248–51.
71. Feizbakhsh A, Naeemy A. Chemical composition of the essential oil of *Cyperus conglomeratus* Rottb. from Iran. *Journal of Chemistry* 2011;8(S1):S293–6.

72. Bannour M, Aouadhi C, Khalfaoui H, Aschi-Smiti S, Khadhri A. Barks essential oil, secondary metabolites and biological activities of four organs of Tunisian *Calligonum azel* Maire. *Chemistry & biodiversity* 2016;13(11):1527–36.
73. El Hanbali F, El Hakmaoui A, Mellouki F, El Rhaffari L, Akssira M. Chemical composition and antibacterial activity of essential oil of *Anvillea radiata* Coss. & Dur. *Natural Product Communications* 2007;2(5):595–7.
74. Cheriti A, Saad A, Belboukhari N, Ghezali S. The essential oil composition of *Bubonium graveolens* (Forssk.) Maire from the Algerian Sahara. *Flavour and Fragrance Journal* 2007;22(4):286–8.
75. Sekkoum K, Belboukhari N, Cheriti A, Aboul-Enein H. Chemical composition of the essential oil of *Zilla macroptera* Coss. from Algerian Sahara. *Current Bioactive Compounds* 2015;11(2):100–3.
76. Timmermann BN, Luzbetak DJ, Hoffmann JJ, Jolad SD, Schram KH, Bates RB, Klenck RE. Grindelane diterpenoids from *Grindelia camporum* and *Chrysothamnus paniculatus*. *Phytochemistry* 1983;22(2):523–5.
77. Hegazy MEF, Mohamed AEHH, El-Razek MHA, Hammouda FM, Hassan NM, Mahalel UA, et al. Genus *Chrysothamnus*: A source of bioactive compounds. *Natural Product Communications* 2007;2(9):951–7.
78. Maatooq GT. Microbiological and chemical transformations of argentatin B. *Zeitschrift für Naturforschung C* 2003;58(3-4):249–55.
79. Dekebo A, Dagne E, Curry P, Gautun OR, Aasen AJ. Dammarane triterpenes from the resins of *Commiphora confusa*. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia* 2002;16(1):81–6.
80. Hoffmann JJ, Aladesanmi AJ, Hutter LK, McLaughlin SP. Triterpene acids from *Cowainea mexicana*. *Planta Medica* 1994;60(01):95.
81. Parente JP, da Silva BP. Bioactive complex triterpenoid saponins from the Leguminosae family. *Natural Product Communications* 2009;4(1): 143–55.
82. Velikova VB. Isoprene as a tool for plant protection against abiotic stresses. *Journal of Plant Interactions* 2008;3(1):1–15.
83. Sharkey TD, Wiberley AE, Donohue AR. Isoprene emission from plants: Why and how. *Annals of Botany* 2008;101(1):5–18.
84. Loreto F, Förster A, Dürr M, Csiky O, Seufert G. On the monoterpene emission under heat stress and on the increased thermotolerance of leaves of *Quercus ilex* L. fumigated with selected monoterpenes. *Plant, Cell & Environment* 1998;21(1):101–7.
85. Zuo Z, Wang B, Ying B, Zhou L, Zhang R. Monoterpene emissions contribute to thermotolerance in *Cinnamomum camphora*. *Trees* 2017;31(6):1759–71.
86. Vickers CE, Gershenzon J, Lerdau MT, Loreto F. A unified mechanism of action for volatile isoprenoids in plant abiotic stress. *Nature Chemical Biology* 2009;5(5):283–91.
87. Ormeño E, Mevy J, Vila B, Bousquet-Mélou A, Greff S, Bonin G, Fernandez C. Water deficit stress induces different monoterpene and sesquiterpene emission changes in Mediterranean species. Relationship between terpene emissions and plant water potential. *Chemosphere* 2007;67(2):276–84.
88. Tounekti T, Vadel AM, Ennajah M, Khemira H, Munné-Bosch S. Ionic interactions and salinity affect monoterpene and phenolic diterpene composition in rosemary (*Rosmarinus officinalis*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 2011;174(3):504–14.
89. Sarmoum R, Haid S, Biche M, Djazouli Z, Zebib B, Merah O. Effect of salinity and water stress on the essential oil components of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.). *Agronomy* 2019;9(5):214.
90. Ormeño E, Fernandez C, Bousquet-Mélou A, Greff S, Morin E, Robles C, et al. Monoterpene and sesquiterpene emissions of three mediterranean species through calcareous and siliceous soils in natural conditions. *Atmospheric Environment* 2007;41(3):629–39.
91. Choudhury FK, Rivero RM, Blumwald E, Mittler R. Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination. *The Plant Journal* 2017;90(5):856–67.
92. Degenhardt J. Ecological roles of vegetative terpene volatiles. In: *Induced plant resistance to herbivory*. Dordrecht, Netherlands: Springer. 2008. p. 433–442.
93. Magalhães DM, Da Silva ITFA, Borges M, Laumann RA, Blassioli-Moraes MC. *Anthonomus grandis* aggregation pheromone induces cotton indirect defence and attracts the parasitic wasp *Bracon vulgaris*. *Journal of Experimental Botany* 2019;70(6):1891–901.
94. Klepzig KD, Kruger EL, Smalley EB, Raffa KF. Effects of biotic and abiotic stress on induced accumulation of terpenes and phenolics in red pines inoculated with bark beetle-vectored fungus. *Journal of Chemical Ecology* 1995;21(5):601–26.
95. Dearing MD, Foley WJ, McLean S. The influence of plant secondary metabolites on the nutritional ecology of herbivorous terrestrial vertebrates. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 2005;36:169–89.
96. Gómez JM, Zamora R, Hódar JA, García D. Experimental study of pollination by ants in Mediterranean High Mountain and arid habitats. *Oecologia* 1996;105(2):236–42.
97. Granero AM, Sanz JMG, Gonzalez FJE, Vidal JLM, Dornhaus A, Ghani J, Serrano AR Chittka L. Chemical compounds of the foraging recruitment pheromone in bumblebees. *Naturwissenschaften* 2005;92(8):371–74.
98. Giuliani C, Ascriczzi R, Lupi D, Tassera G, Santagostini L, Giovanetti M, Flamini G, Fico G. *Salvia verticillata*: Linking glandular trichomes, volatiles and pollinators. *Phytochemistry* 2018;155:53–60.
99. Al-Namazi A. Effects of plant-plant interactions and herbivory on the plant community structure in an arid environment of Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences* 2019;26(7):1513–8.
100. Friedman J. Allelopathy in desert ecosystems. In: *Allelochemicals: Role in agriculture and forestry*. Washington, USA: ACS Publications. 1987. p. 53–68.
101. Friedjung AY, Choudhary SP, Dudai N, Rachmilevitch S. Physiological conjunction of allelochemicals and desert plants. *PloS One* 2013;8(12):e81580.
102. Saharkhiz MJ, Smaeili S, Merikhi M. Essential oil analysis and phytotoxic activity of two ecotypes of *Zataria multiflora* Boiss. growing in Iran. *Natural Product Research* 2010;24(17):1598–609.
103. Samoylenko V, Dunbar DC, Gafur MA, Khan SI, Ross SA, Mossa JS, et al. Antiparasitic, nematicidal and antifouling constituents from *Juniperus* berries. *Phytotherapy Research* 2008;22(12):1570–6.
104. Smolander A, Kanerva S, Adamczyk B, Kitunen V. Nitrogen transformations in boreal forest soils—Does composition of plant secondary compounds give any explanations?. *Plant and Soil* 2012;350(1-2):1–26.



Distribution modeling, soil properties, and variation in essential oils chemical composition of *Rhanterium adpressum* Coss. & Dur.

¹Laboratoire des Sciences Fondamentales à l'Université Amar TELI-DJI de Laghouat, Route de Ghardaïa BP37G (03000), Laghouat, Algérie
Corresponding author;
E-mail: d.tahri@lagh-univ.dz

Djilali Tahri^{1*}, Fatiha Elhouiti¹, Mohamed Ouinten¹, Mohamed Yousfi¹

ABSTRACT

Modeling the distribution of *Rhanterium adpressum*, an endemic species from southwestern Algeria, and the interactions of soil's chemical properties with the variability of chemical composition of its essential oils makes the objective of this study. Obtained MaxEnt model (AUC = 0.98) showed that the general distribution of genus *Rhanterium* established mainly by the contribution of eight bioclimatic variables derived from temperature and precipitation (90.5%). Projection of the model in future conditions until 2070 reveals that the habitats of this species will be very affected by climate changes. The analysis of 9 soil samples shows a sandy (77–96%), alkaline, and calcareous character with an electrical conductivity between 0.2 and 1.8 dS/m at 20°C. The chemical composition of terpenoids families during a period of 5 months was dominated by monoterpene hydrocarbons (70–90%) followed by oxygen monoterpenes (4.5–9.2%), hydrocarbon sesquiterpenes (1.6–9.9%), and oxygenated sesquiterpenes (4.3–7.2%). The variation of this composition in relation with phenological cycle and physicochemical properties of the soil was discussed.

KEYWORDS

Rhanterium adpressum, species distribution modeling, climate changes, soil properties, essential oils

 © 2019 Djilali Tahri et al.

This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs license

INTRODUCTION

Modeling habitat suitability and species distribution in ecological sciences has created new perspectives for studies of the behavior of fauna and flora interacting with different environmental factors and conditions. Field observations, historical records, specimens from museums, and reliable observations recorded by amateurs with the emergence of “Citizen-Scientist” were the sources of data for these modeled investigations (Guisan et al., 2017). For this purpose, several computing platforms have been developed to generate robust and presentational models (Phillips et al., 2006; Leroy et al., 2016; Golding et al., 2018).

Generally in species distribution models, variables such as temperature, precipitation, their derivatives, and altitude are used to predict suitable habitat for species whether in the past or in current or future conditions and between the effective niches and real niches, differences can arise between generated models and actual dynamics for a particular popula-

tion. One of the major factors influencing these differences is the physicochemical composition of soils, especially in arid environments where plants face various types of stresses affecting their distribution, morphology, and biological functioning (Hageer et al., 2017; Buri et al., 2017).

Many studies have focused on the aspects of the effect of constituents of edaphic factor on plant growth and chemical composition of different metabolites of interest. Essential oils have been shown to be affected by all these changes either by a high production of a family of terpenes or by variation in elemental components, characterizing one of the chemical responses to surrounding conditions.

Rhanterium adpressum Coss. & Dur., a shrub of *Inuleae* tribe (*Asteraceae*) distributed in arid and hyperarid environments of Northwest Africa is the subject of this study with a maximum entropy modeling of its potential distribution in current and future climatic conditions; according to Representative Concentration Pathway (RCP) scenarios, properties of soil

and variation in the chemical composition of essential oils have been interpreted and their relation has been discussed in the light of the other studies.

1. MATERIALS AND METHODS

1.1. Plants samples and extraction of essential oils

Aerial parts of *R. adpressum* were harvested for 5 successive months (November–March) from three different sites in southern Algeria. Coordinates, altitudes, and climatic character of these sites are presented in Figure 1. These sites are in a region of hyperarid climate characterized by a thermal amplitude of up to 38.6°C and an annual precipitation about 67.3 mm. The samples were dried at room temperature, away from light, and humidity, and then the leaves are separated for extraction of essential oils with hydrodistillation using a Clevenger apparatus (Clevenger, 1928), obtained oils were treated with anhydrous sodium sulfate and stored at +4°C.

1.2. GC analysis

Chromatographic analyses of volatile compounds were carried out at the Research Laboratory of Fundamental Sciences at the University of Laghouat in Algeria, using a gas chromatograph GC-5400 equipped with a flame ionization detector (FID) and a fused silica capillary column of type DB-5 (30 m × 0.32 mm, film thickness = 0.10 µm). The vector gas used is hydrogen with a flow rate of 1 mL/min. The temperature of the column is programmed at a rate of 5°C/min from 50°C to 250°C. The temperature of injector and detector was set at 250°C and 280°C, respectively. Essential oil solutions are prepared by dissolving 10 µL of each in 1 mL of pentane organic solvent. Linear retention indices of the constituents are based on a series of alkane

(C8–C20) analyzed under the same operating conditions as those of the samples.

1.3. Soil analysis

pH was measured with a pH meter in a water suspension, with a soil-to-water ratio of 1/2.5. Electrical conductivity (EC) was determined by a conductivity meter at 25°C with a soil-to-solution ratio of 1/5. Calcium carbonate (CaCO₃) content was determined by the volumetric method consisting of an acid treatment of the soil with hydrochloric acid (HCl), followed by a titration of the excess of HCl with sodium hydroxide (NaOH) in the presence of phenolphthalein that allows a change of the mixture color passing from transparent to pink. Total nitrogen determination was made by Kjeldahl method, potassium (K⁺) by a flame spectrometer, and phosphorus (P) by spectrometry. Soil texture of the samples was determined by Robinson's pipette based on the Stokes law.

1.4. Species distribution modeling

MaxEnt 3.4.1 was used to establish current and future distribution models of *R. adpressum*; it is known by its very good performance especially with small samples (Elith et al., 2006). The 99 points of presence make the samples of this analysis; the points were downloaded from Global Biodiversity Information Facility (GBIF) in addition to our own recorded observations. Climate data have been downloaded from WorldClim Version 2 (Hijmans et al., 2005) with a spatial resolution of 30 s (~1 km); these are monthly mean data of minimum, mean and maximum temperature, and precipitation from 1970 to 2000, of which a total of 19 WorldClim bioclimatic were used to predict the potential distribution of *R. adpressum*. The general parameters of model execution in threshold features are 10 replications of cross-validate, max iteration at 500, and logistic ASC output format. Climate projection for predicting the influence

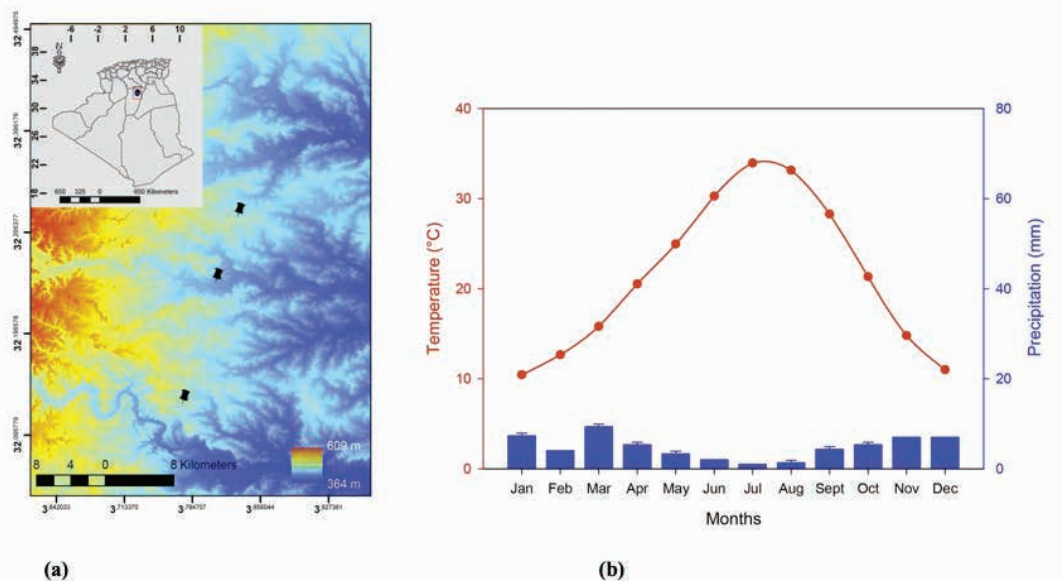


Figure 1: Presentation of *R. adpressum* sampling stations: (a) elevation map of study area where collection sites are represented by black pushpins and (b) ombrothermic diagram of the three sites.

of climate changes under the four RCP scenarios (2.6, 4.5, 6.0, and 8.5) up to 2070 was based on GCSM data of 30-s resolution applying 10-percentile training presence threshold rule.

1.5. Statistical analysis

Statistical significance of effects and interactions of soil properties with chemical families of the total composition of essential oils was performed by factorial analysis with Minitab 17.3.1.

2. RESULTS

2.1. Modeling the distribution of *R. adpressum*

In the obtained MaxEnt model, 89 presence records were used for training and 10,089 points were used to determine the MaxEnt distribution (background points and presence points) with training area under curve, AUC = 0.984. In Figure 2, distribution model and favorable habitats for the genus *Rhanterium* extend from the west to the east of Algeria in an arid and hyperarid climatic zone (aridity index: between 0.03 and 0.19), this model is not specific for *R. adpressum* but also for the other two species, namely, *Rhanterium suaveolens* to the east, *R. adpressum* from the west to the center of this zone in a geographical extent started from southern Morocco and between these two typical species are habitats for hybrids such as *Rhanterium intermedium*, a comparison of morphological variations between these three species is part of the study of Wiklund (1986). A fluctuation in the temperature is more or less important from 1 month to another relative to the year (Bio3); the mean temperature of coldest quarter (Bio11) and the mean temperature of driest quarter (Bio9) are the bioclimatic variables that have the greatest contribution to determining the most favorable habitats for the distribution of these species (Fig. 3).

Future projections for the impact of climate change on the distribution of *Rhanterium* show that, for all scenarios, favorable habitats for this species will be changed (Fig. 2) and, therefore, these habitats will be very limited and may be rare as a result of significant drought trends in these areas resulting from global warming, leading to soil degradation and disruption of the hydrological cycle as climate simulations reveal an expansion of arid zones by 10% on the horizon of 2100 (Huang et al., 2016) and the warming can go up by 1.6°C until 2050 (Lioubimtseva, 2004).

2.2. Soil chemical properties

The average of chemical properties of nine soil samples from the three investigated sites is shown in Figure 4. Sand dominates physical composition of all samples (77–96%) with low percentages of silt (3–24%) and clay (0.3–8%). A calcareous aspect has been characteristic for these samples with percentages between 35% and 45%, CaCO_3 has buffered the pH of soil around 8.2 and 8.7, and in this type of soil, pH cannot be changed; alkalinity, therefore, decreases the permeability of the soil, and plants, in general, are facing nutrient absorption restrictions (Dagar, 2005; Jafari et al., 2018).

2.3. Essential oils chemical composition

Chromatographic analyses of 15 samples of *R. adpressum* essential oils distributed in 5 months from 3 sites allowed to show the variability in chemical composition of terpenes families (Fig. 5). The dominance of monoterpenes hydrocarbons family (77–90%) in this composition is characterized by compounds with higher or lower percentages depending on month and site; α -pinene (9–26.6%), β -pinene (7–22%), α -terpinene (0.6–9%), and limonene (1.1–15.9%). Oxygenated monoterpenes (4.5–9.2%), sesquiterpenes hydrocarbons (1.6–9.9%),

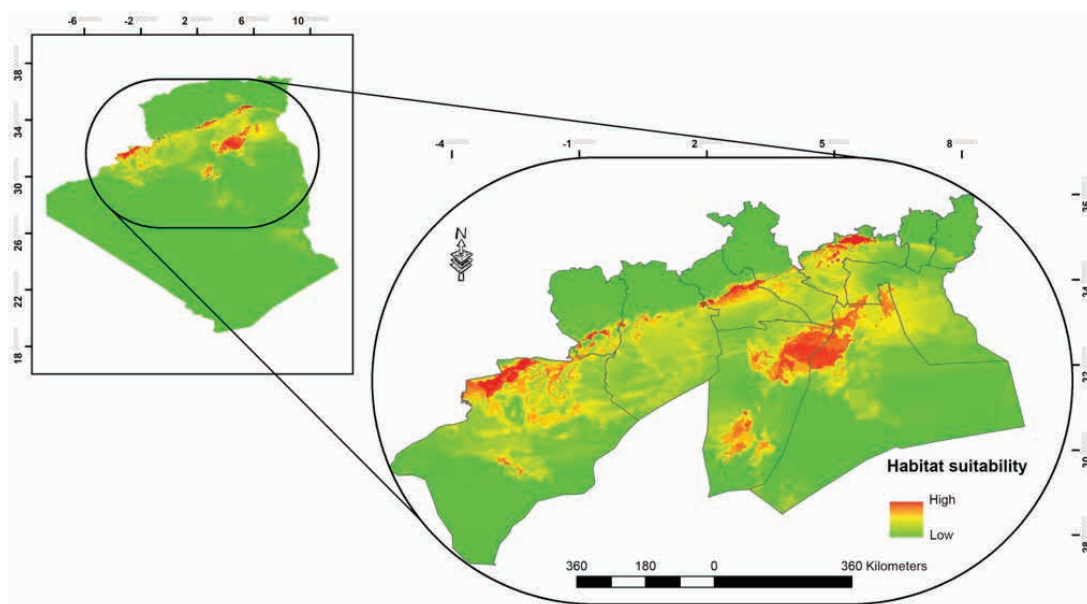


Figure 2: Presentation of distribution model based on the prediction of favorable habitats of the genus *Rhanterium* in Algeria

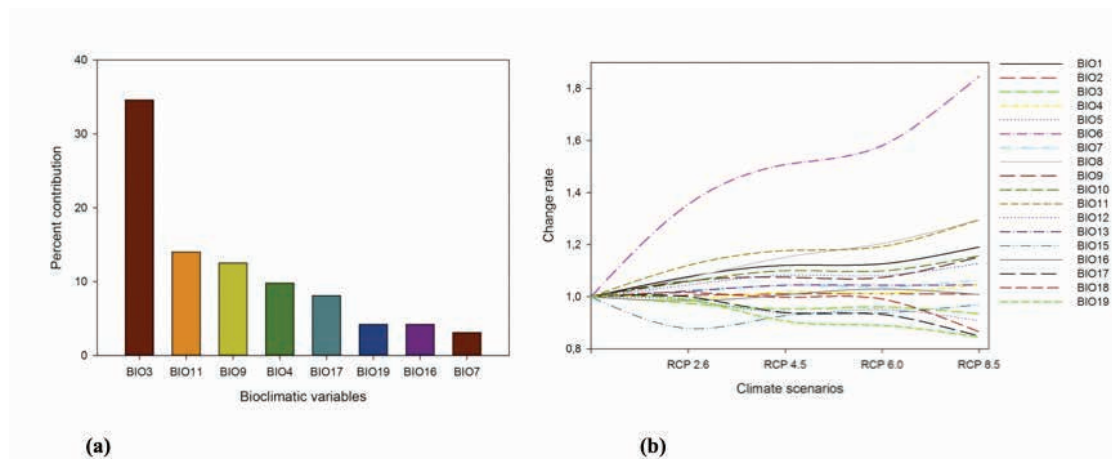


Figure 3: Bioclimatic variables, contribution, and variation in obtained models: (a) percent contribution of the first eight variables in the distribution model under current conditions and (b) change rate of these variables according to the four RCP scenarios.

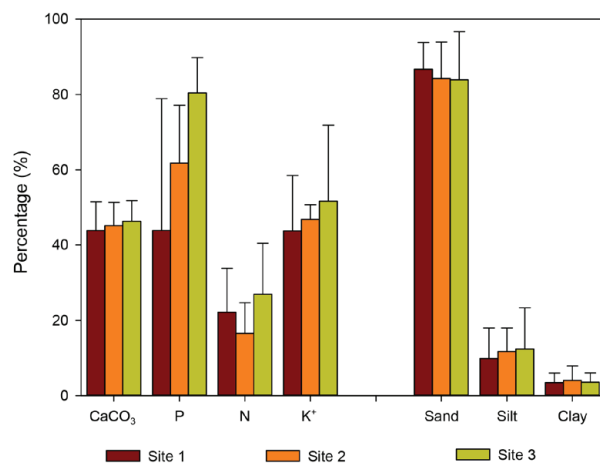


Figure 4: Average percentages of chemical and physical components of the analyzed soil samples.

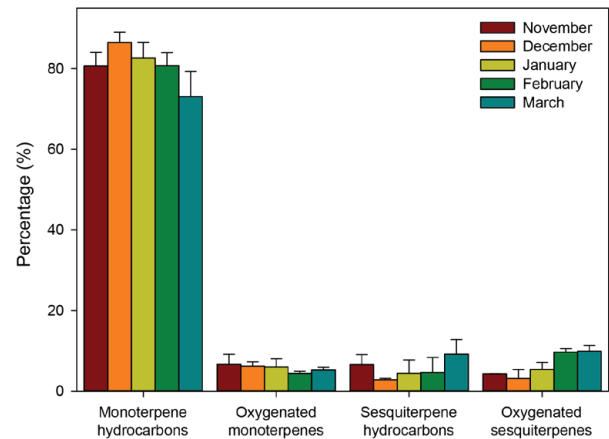


Figure 5: Average of chemical composition families of *R. adpressum* essential oils from three sites in a period of 6 months.

and oxygenated sesquiterpenes (4.3–7.2%) are terpenoids that have been weakly synthesized by the plant during this period of the year.

3. DISCUSSION

R. adpressum forms large clumps in dayas, river beds, sand dunes, and Hamadas in altitudes between 600 and 1200 m. It has been noticed that the temperature has increased in high zones, thus increasing the diurnal difference between minimum and maximum temperatures, which explains the elevation-climate change relationship and suggestions of studies that higher regions are warming up faster than others (Bandopadhyay, 2016). On the other hand, the flowering of *R. adpressum* was reported in 19th and 20th centuries between March and June (Battandier and Trabut, 1888; Wiklund, 1986), whereas today this period starts earlier in December and January until April and May under the effect of temperature and photoperiod showing the sensitivity of flowers to these factors (Craufurd and Wheeler, 2009). This shift of flowering has also been noticed in other species (Fitter and Fitter 2002), therefore,

influencing other animals for which pollen and seeds are important resources, and by these great changes, the ecosystem structures will be disrupted (Visser and Holleman, 2001).

Other factors such as overgrazing, cultivation, and land grabbing may also affect the habitats of this species. On the basis of on a diachronic comparison (1989 and 2007) of *R. suaveolens* steppe in Tunisia, a regression by 52.7% of this steppe was noticed with a rate of decline of 1.28% (Attia et al., 2014). On this steppe, studies have investigated the impact of overgrazing and anthropogenic factor that caused by its degradation a scarcity of the vegetation cover, leading to desertification and disorganization of the physical states of soils (Novikoff, 1976; Jauffret and Lavorel, 2003).

The soil stoichiometry of CaCO₃/P ratio available in arid and semiarid zones significantly influences plant growth and plant density; this relation inversely proportional with four communities of *Artemisia ordosica* was the objective of XueLai et al. (2012) study. Alkalinity noticed in the samples is interpreted by sodicity represented by an electrical conductivity (EC) between 0.2 and 1.8 dS/m at 20°C; in this conductivity range, the total concentrations of salts are not high but the percentage of

exchangeable sodium (PES) can be at levels harmful to plants (Jafari et al., 2018) and the chemistry of these soils will also be influenced by the levels of CaCO_3 , K^+ , P , NO_3^- , and N . These minerals are crucial for the development of plants and can constitute, among others, 5–10% of biomass. Plants, on their part, play an important role in redistribution, transformation, chemical movement from/to light, atmosphere, and soil; the fact that plants can change their local environments (soil) especially in arid environments is a character of desert shrubs and steppe ecosystems, leading to the concept of “islands of fertility” (Jobbágy and Jackson, 2004; Waring et al., 2015; Schlesinger et al., 1996).

In a previous study, it was noticed that in terpenes families, in the composition of essential oils from *R. adpressum* extracted during a period of 3 months, April, May, and June which represent the terminal phase of vegetative cycle, there is a decrease in the percentage of monoterpenes hydrocarbons and a slight increase in the percentage of oxygenated monoterpenes with a nonsignificant variability in the total sesquiterpenes percentages. This is a remark noted in the two parts of the plant: leaves and flowers (Elhouiti et al., 2017). It was found that following the phenological cycle of *R. adpressum*, the total chemical composition of essential oils is mainly characterized by monoterpenes hydrocarbons but with remarkable temporal and spatial variations in elemental composition (Elhouiti et al., 2016, 2017).

Studies have proven the variation in content, quality, and composition of essential oils with the progression of plant phenology (Mirjalili et al., 2006; Chauhan et al., 2013), and in the same phenological stage, these characteristics are also varied according to altitude and the factors of microclimate (Alimohammadi et al., 2017; Lago et al., 2006). This variability may be a consequence of all these influences, but it also results from mechanisms of regulation of production of terpenes in response to different stresses, attacks of herbivores, and physical changes in habitat (Mann, 1987).

3.1. Soil properties and essential oils chemical composition relationship

Salinity and sodicity problems are widespread in arid and semi-arid zones. In fact, halomorphous soils have been identified as saline, alkaline, sodium, saline-alkaline, or saline-sodium characterizing steppic and semi-desert lands (Dagar 2005). Sodicity and salinity exert chemical pressures by affecting seed germination, vegetative growth, and osmotic functioning (Singh et al., 2015). In this study, the statistical analysis of factorial design

made it possible to show significantly positive ($\alpha = 0.05$) relations of EC, P, and their association with the variation in monoterpenes (Coeffs: 357, 384.9, and 408.3) and sesquiterpenes (Coeffs: 86.5, 84.25, and 92.05) hydrocarbons. In contrast, a significant negative interaction among these variables and oxygenated monoterpenes (–150.4, –153.9, and –165.5) and sesquiterpenes (–293, –315.2, and –334.7) has been revealed.

Mineral nutrients and their effects on yield and composition of essential oils have been investigated by several studies. Prasad et al. (2006) investigated on the influence of sodicity on growth and yield of Geranium essential oil and reported that they increase with the increase in PSE of up to 16% and 7%, respectively, and beyond a significant decrease was noticed. In another study, PSE concentrations remarkably affect the growth of *Ocimum sanctum* and the cation content at all tested levels 15.7, 35.6, and 54.6 (Singh et al., 2015). The addition of phosphorus increases cation content, vegetative characteristics of *Lavandula x intermedia*, and essential oil content at a tolerable level of 100 kg ha⁻¹ (Erbaş et al., 2017). The effect of N, P, and K doses on the growth and yield of essential oils of *Mentha longifolia*, *Ocimum basilicum*, and *Matricaria chamomilla* showed more or less tolerable responses of plants to these changes (Alsafar and Al-Hassan, 2009; Sharafzadeh et al., 2011; Emongor et al., 1990).

Showing effects–responses of these environmental factors on studied plants helps to explain the interactions governing phenological cycle, but it still remains in agricultural perspectives. In the wild, responses of plants in their niches differ from “inductive” aspect by an “adaptive” aspect, and, therefore, morphology and chemistry of these plants will be characteristic in a given biotope. In arid climates, plants use volatile compounds, often monoterpenes (Mann, 1987), a response due to adaptive behavior because, for limited nitrogen plants, for example, the metabolic cost to produce alkaloids is very expensive than producing terpenoids (Feeny, 1976) and these terpenoids can play important roles in communication, in attraction, and, through their mobility and diffusion in air and in soil, in defense (Yazaki et al., 2017).

Acknowledgements: The authors would like to thank Mr. Elhouiti Badreddine, Mr. Elhouiti AbdelKader, and Pr. Gourine Nadhir for their help in the realization of this study.

Conflict of interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

References

- Alimohammadi, M., Yadegari, M., & Shirmardi, H. A. (2017). Effect of elevation and phenological stages on essential oil composition of *Stachys*. *Turkish Journal of Biochemistry*, 42(6), 647–656.
- Alsafar, M. S., & Al-Hassan, Y. M. (2009). Effect of nitrogen and phosphorus fertilizers on growth and oil yield of indigenous mint (*Mentha longifolia* L.). *Biotechnology*, 8(3), 380–384.

- Attia, W., Tarhouni, M., & Belgacem, A. O. (2014). Dynamique de la steppe à *Rhanterium suaveolens* Tunisie présaharienne. *Revue des Régions Arides*, 34(2), 103-114.
- Bandopadhyay, S. (2016). Does elevation impact local level climate change? An analysis based on fifteen years of daily diurnal data and time series forecasts. *Pacific Science Review A: Natural Science and Engineering*, 18(3), 241-253.
- Battandier, J. A. & Trabut, L. (1888). *Flore de l'Algérie*, Vol. 1, Alger : Jourdan A.
- Buri, A., Cianfrani, C., Pinto-Figueroa, E., Yashiro, E., Spangenberg, J. E., Adatte, T. & Pradervand, J. N. (2017). Soil factors improve predictions of plant species distribution in a mountain environment. *Progress in Physical Geography*, 41(6), 703-722.
- Chauhan, N. K., Singh, S., Haider, S. Z., & Lohani, H. (2013). Influence of phenological stages on yield and quality of oregano (*Origanum vulgare* L.) under the agroclimatic condition of doon valley (uttarakhand). *Indian journal of pharmaceutical sciences*, 75(4): 489-493.
- Clevenger, J. F. (1928). Apparatus for the determination of volatile oil. *The Journal of the American Pharmaceutical Association* (1912), 17(4), 345-349.
- Craufurd, P. Q., & Wheeler, T. R. (2009). Climate change and the flowering time of annual crops. *Journal of Experimental botany*, 60(9), 2529-2539.
- Dagar, J. C. (2005). Salinity research in India: An overview. *Bulletin of the National Institute of Ecology*, 15, 69-80.
- El Houiti, F., Tahri, D., Seba, M., Ouinten, M., Gaydou, E. M., & Yousfi, M. (2016). Inhibition of *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* by essential oils of flowers and stems of *Rhanterium adpressum*. *PhOL PharmacologyOnline*, 3(22), 141-150.
- Elhouiti, F., Tahri, D., Takhi, D., Ouinten, M., Barreau, C., Verdal-Bonnin, M. N., & Yousfi, M. (2017). Variability of composition and effects of essential oils from *Rhanterium adpressum* Coss. & Durieu against mycotoxinogenic *Fusarium* strains. *Archives of microbiology*, 199(10), 1345-1356.
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., ... & Li, J. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151.
- Emongor, V. E., Chweya, J. A., Keya, S. O., & Munavu, R. M. (1990). Effect of nitrogen and phosphorus on the essential oil yield and quality of chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) flowers. *East African Agricultural and Forestry Journal*, 55(4), 261-264.
- Erbaş, S., Kucukyumuk, Z., Baydar, H., Erdal, I., & Sanli, A. (2017). Effects of different phosphorus doses on nutrient concentrations as well as yield and quality characteristics of lavandin (*Lavandula x intermedia* Emeric ex Loisel. var. Super). *Turkish Journal Of Field Crops*, 22(1), 32-38.
- Feeny, P. (1976). Plant apparency and chemical defense. In *Biochemical interaction between plants and insects* (pp. 1-40). Springer, Boston, MA.
- Fitter, A. H., & Fitter, R. S. R. (2002). Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, 296(5573), 1689-1691.
- Golding, N., August, T. A., Lucas, T. C., Gavaghan, D. J., van Loon, E. E., & McInerney, G. (2018). The zoon R package for reproducible and shareable species distribution modelling. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(2), 260-268.
- Guisan, A., Thuiller, W., & Zimmermann, N. E. (2017). *Habitat suitability and distribution models: with applications in R*. Cambridge University Press.
- Hageer, Y., Esperón-Rodríguez, M., Baumgartner, J. B., & Beaumont, L. J. (2017). Climate, soil or both? Which variables are better predictors of the distributions of Australian shrub species?. *Peer J*, 5, e3446.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 25(15), 1965-1978.
- Huang, J., Ji, M., Xie, Y., Wang, S., He, Y., & Ran, J. (2016). Global semi-arid climate change over last 60 years. *Climate Dynamics*, 46(3-4), 1131-1150.
- Jafari, M., Tavili, A., Panahi, F., Esfahan, E. Z., & Ghorbani, M. (2018). Characteristics of Arid and Desert Ecosystems. In *Reclamation of Arid Lands* (pp. 21-91). Springer, Cham.
- Jauffret, S., & Lavorel, S. (2003). Are plant functional types relevant to describe degradation in arid, southern Tunisian steppes?. *Journal of Vegetation Science*, 14(3), 399-408.
- Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2004). The uplift of soil nutrients by plants: biogeochemical consequences across scales. *Ecology*, 85(9), 2380-2389.
- Lago, J. H. G., Fávero, O. A., & Romoff, P. (2006). Microclimatic factors and phenology influences in the chemical composition of the essential oils from *Pittosporum undulatum* Vent. leaves. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 17(7), 1334-1338.
- Leroy, B., Meynard, C. N., Bellard, C., & Courchamp, F. (2016). Virtual species, an R package to generate virtual species distributions. *Ecography*, 39(6), 599-607.
- Lioubimtseva, E. (2004). Climate change in arid environments: revisiting the past to understand the future. *Progress in Physical Geography*, 28(4), 502-530.
- Mann, J. (1987). *Secondary metabolism*. Oxford University Press.
- Mirjalili, M. H., Salehi, P., Sonboli, A., & Vala, M. M. (2006). Essential oil variation of *Salvia officinalis* aerial parts during its phenological cycle. *Chemistry of Natural Compounds*, 42(1), 19-23.
- Novikoff, C. (1976). Traditional grazing practices and their adaptation to modern conditions in Tunisia and the Sahelian countries. *Ecological Bulletins*, 55-69.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Prasad, A., Chattopadhyay, A., Chand, S., Naqvi, A. A., & Yadav, A. (2006). Effect of Soil Sodidity on Growth, Yield, Essential Oil Composition, and Cation Accumulation in Rose-Scented Geranium. *Communications in soil science and plant analysis*, 37(13-14), 1805-1817.
- Schlesinger, W. H., Raikes, J. A., Hartley, A. E., & Cross, A. F. (1996). On the Spatial Pattern of Soil Nutrients in Desert Ecosystems. *Ecology*, 77(2), 364-374.
- Sharafzadeh, S., Esmaili, M., & Mohammadi, A. H. (2011). Interaction effects of nitrogen, phosphorus and potassium on growth, es-

- sential oil and total phenolic content of sweet basil. *Advances in Environmental Biology*, 5(6):1285-1290.
- Singh, P. K., Verma, N. S., Pandey, N., & Singh, P. (2015). Soil Sodidity Induced Changes in Aromatic Plants: Effects on Growth, Water Relation, Photosynthetic Pigments, Antioxidative Enzymes, Cations Concentration and Quality of *Ocimum sanctum*. *Research Journal of Medicinal Plants*, 9: 375, 394.
- Visser, M. E., & Holleman, L. J. (2001). Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 268(1464), 289-294.
- Waring, B. G., Álvarez-Cansino, L., Barry, K. E., Becklund, K. K., Dale, S., Gei, M. G. & Riggs, C. E. (2015). Pervasive and strong effects of plants on soil chemistry: a meta-analysis of individual plant 'Zinke' effects. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1812), 20151001.
- Wiklund, A. (1986). The genus *Rhanterium* (*Asteraceae: Inuleae*). *Botanical journal of the Linnean Society*, 93(2), 231-246.
- Yazaki, K., Arimura, G. I., & Ohnishi, T. (2017). 'Hidden' terpenoids in plants: their biosynthesis, localization and ecological roles. *Plant and Cell Physiology*, 58(10):1615-1621.
- Zhao, X., He, X., Xue, P., Zhang, N., Wu, W., Li, R., & Zhao, H. (2012). Effects of soil stoichiometry of the CaCO₃/available phosphorus ratio on plant density in *Artemisia ordosica* communities. *Chinese Science Bulletin*, 57(5), 492-499.

Distinction of the distribution areas of genus *Rhanterium* and comparison of the habitat preferences of species by maximum entropy modeling

Djilali Tahri, Fatiha Elhouiti, Mohamed Ouinten & Mohamed Yousfi

Laboratoire des Sciences Fondamentales à l'Université Amar TELIDJI de Laghouat,
Route de Ghardaïa BP37G (03000), Laghouat, Algérie,
e-mails: d.tahri@lagh-univ.dz (corresponding author),
F.ELHouiti@gmail.com, ouintenmed@lagh-univ.dz,
yousfim8@gmail.com

Received: November 12, 2019 ▷ Accepted: February 06, 2020

Abstract. The objective of this study is to distinguish the distribution areas of *Rhanterium adpressum* and *Rhanterium suaveolens* and show the hybrid zone of *Rhanterium intermedium*. Two models of distribution with high predictive accuracy were obtained for *R. adpressum* (AUC=0.98±0.006) and *R. intermedium/suaveolens* (AUC=0.98±0.01). Precipitation of the driest month and temperature seasonality contributed most to the model of *R. adpressum*, with 27.8 % and 21.8 %, respectively. On the other hand, precipitation and mean temperature of the driest quarter contributed most to the model of *R. intermedium/suaveolens*, with 26.4 % and 20.8 %, respectively. Response curves of the species to bioclimatic factors and elevation show that *R. adpressum* prefers high-altitude habitats (888.74m), less hot (18.65 °C) and rainy (140.72 mm). *R. intermedium/suaveolens* species are distributed in warmer areas (21.61 °C), at lesser height (255.18 m) and with less rain 86.62 mm.

Key words: *Rhanterium adpressum*, *R. intermedium*, *R. suaveolens*, species distribution modeling

Introduction

Genus *Rhanterium* Desf. (1799) belongs to *Inuleae* tribe of *Asteraceae*. The species of that genus are strongly branched shrubs, stems and leaves coated with whitish hairs, with small leaves, always sessile, slightly dentate and deciduous, with spherical involucre, and capitula formed of several rows of bracts (Ozenda 2004). The genus includes four species, namely: *R. epapposum* Oliv. (1881) endemic to the Arabian Peninsula, *R. adpressum* Coss. & Dur. (1855) distributed in South Morocco, Mauritania and West Algeria, and the third species *R. suaveolens* Desf. (1799) spreading from East Algeria to South Tunisia and Libya. A hybrid species named *R. intermedium* Pomel (1874) is distributed in the meeting areas of the two latter species in Central Algeria and has

characteristically intermediate morphology between *R. adpressum* and *R. suaveolens*, occasionally close to one or another of the two (Wiklund 1986).

R. adpressum is generally recognized by its large multiflower capitula and subglobular involucre, with bracts densely appressed. This is a plant much appreciated by camels and used by local people in the production of cheese and as firewood (Gauthier-Pilters 1961). *R. suaveolens* stands out with its narrow, pointed and, when mature, revolute involucre bracts. The general characteristics of *R. intermedium* are the medium or small capitula, with a degree of outward bending of involucre bracts to 45° and average length of the lamina (Wiklund 1986).

R. adpressum and *R. intermedium/suaveolens* species grow in sandy or clayey plains, sandy or silty riverbeds,

and on sand dunes in arid to hyper-arid climatic zones extending from the west to the east of Algeria. These zones border on the Saharan Atlas and highlands in the north and the beginning of Sahara in the south (4 to 8°E, 29 to 35°N). Elevations in these areas decrease eastwards, starting from 1000–1200 m in the west and reaching 50–200 m in the east. The vegetative cycle begins in the autumn, with a flowering period generally between April and June, but occasionally blooming is observed earlier in November and December, when the plants take advantage of autumn rains.

Literature does not show any works dealing with studies on *R. intermedium*, apart from a comparative study by Wiklund (1986). Most studies published in recent years involve the biochemical aspects of *R. adpressum* or *R. suaveolens* by studying the biological properties of phenolic or lipid extracts and essential oils (Hamia & al. 2013; Boussoussa & al. 2016; Chemsa & al. 2016; Elhouiti & al. 2017), or by studying the nutritional values considering the importance of these plants as a fodder resource (Chehma & Youcef 2009). The present study focuses on the ecological properties and compares the distinct differences between the habitats of the species.

The objective of this study is to model habitats suitability of *R. adpressum* and *R. suaveolens* species, to distinguish their distribution areas and show the zone, in which the hybrid species *R. intermedium* is distributed, with an analysis of habitat preferences for each species. The results will contribute to the Maghreb studies interested in these three species by highlighting their biochemical potential or their genetic variations. Furthermore, the populations of *R. adpressum* and *R. suaveolens* have an allopatric model of speciation, which enhances the knowledge of distribution areas for in-depth studies of ecology and genetics.

Material and methods

Study area and species occurrence

The study area extended from western to eastern parts of Algeria (–4.7°E–7.5°E, 29°N–35°N) and in the south from the Saharan Atlas to the north of Sahara. The investigated species in that area were *Rhanterium suaveolens* Desf. (1799), *Rhanterium adpressum* Coss. & Dur. (1855) and *Rhanterium intermedium* Pomel (1874), with a synonym: *Rhanterium suaveolens* Desf. ssp. *intermedium* (Pomel) (Quezel & Santa 1963).

The points of presence were picked out from the digitized herbarium of the National Museum of Natural History of France (<https://science.mnhn.fr/institution/mnhn/collection/p/item/search>), in addition to our own observations. One hundred and ten points were obtained for *R. adpressum*, generally in Bechar (–3.7–0.4°E, 29.6–32.2°N), Naama (–1.1–0.1°E, 32.3–33°N) and Laghouat (2–3°E, 33.2–33.9°N). For the prediction of suitable habitats of *R. suaveolens* and *R. intermedium*, 100 points were used. Verification of the scientific names followed the International Plant Names Index (<https://www.ipni.org>), while geo-referencing of the occurrence points used the Geoplaner website (<https://www.geoplaner.com>).

Climatic predictors and predictive modeling

This study was based on the presence-only technique favored by the presence-absence data collection technique (Thompson & al. 2009). Nineteen bioclimatic variables, plus the altitude factor, were used to accomplish the distribution model and habitat suitability analysis. The variables were derived from temperature and precipitation, generally indicative of the trends for these two parameters, which were considered ecologically more sensitive for demarcating the physio-ecological tolerances of the habitat than the simple variables of temperature and precipitation (Graham & Hijmans 2006; Pramanik & al. 2018). These 20 variables were downloaded from the WorldClim website (<https://www.worldclim.org>), version 2, with a resolution of 30 arc seconds (~1 Km). The data were interpolation results from the historical records (1970–2000) of monthly temperature and precipitation.

Modeling of distribution of the *Rhanterium* species was carried out with MaxEnt 3.4.1, which provided good results even for small samples (Phillips & al. 2006; Elith & al. 2011). The evaluation of obtained models was based on the Area Under Curve (AUC), which varied between 0 to 1, where a model with AUC ≥ 0.9 signified a very high performance (Thuiller & al. 2005). General parameters of the model execution were 10 replications of cross-validation, max iteration at 500, regularization multiplier in default value (1), and in logistic ASC output format. Response curves of the studied species to bioclimatic variables were generated as mean values, with standard deviation of 10 replications for cross-validation. Some of these curves were redrawn with SigmaPlot 12.5 to present them in the results.

Results

Two models of good quality were obtained for *R. adpressum* and *R. intermedium/suaveolens* with Area Under Curve (AUC), of 0.98 ± 0.006 and 0.98 ± 0.01 , respectively. Bioclimatic predictors with majority contribution to the MaxEnt models have been given in Table 1. Precipitation in the driest month and quarter was the predictor which contributed most to the obtained models (27.8% to the model of *R. adpressum* and 26.4% to the model of *R. intermedium/suaveolens*). Furthermore, temperature seasonality also contributed greatly to these two models (21.8% and 18.7%, respectively), knowing that that predictor measured the temperature changes during the year. Between the two models, temperature-derived factors contributed more than 60% to the *R. intermedium/suaveolens* model, contrary to the *R. adpressum* model, where precipitation factors contributed up to 55%.

The distribution map of *Rhanterium* species in Algeria generated by the two models of MaxEnt is shown in Fig. 1. These species are distributed to the south of the Saharan Atlas and to the north of Sahara, from Bechar in the west to ElOuadi in the east, on a stretch up to 1100 km long and about 500 km wide. *R. adpressum* is distributed in South Morocco and Mauritania, and in Algeria from the west to the center (4°E, 32–33°N), while distribution of *R. suaveolens* begins just after

Table 1. High contribution percentage to the development of two habitat-suitability prediction models for *R. adpressum* and *R. intermedium/suaveolens*.

<i>R. adpressum</i>	
Precipitation of driest month	27.8 %
Temperature seasonality (coefficient of variation)	21.8 %
Precipitation of driest quarter	10.5 %
Precipitation of wettest quarter	9.9 %
Annual temperature range	7.9 %
Mean temperature of warmest quarter	5.8 %
<i>R. intermedium/suaveolens</i>	
Precipitation of driest quarter	26.4 %
Mean temperature of driest quarter	20.8 %
Temperature seasonality (coefficient of variation)	18.7 %
Precipitation of coldest quarter	5.7 %
Precipitation of wettest month	5.1 %
Annual mean diurnal range	4.6 %

5°E, 31–35°N to Tunisia and Libya. Between these two areas (red lines in Fig. 1), the hybrid species *R. intermedium* is distributed between 3–4°E and 29–34°N.

Four responses of the *Rhanterium* species to environmental factors after 10 replications for cross-validation are shown in Fig. 2. These responses show the preferences of these species for each factor. The values with their standard deviation are given in Table 2. For both factors, the mean annual temperature and mean temperature of the driest quarter, the response interval of *R. adpressum* is lower than of the other two species *R. intermedium/suaveolens*, with a ≤ 0.65 probability of

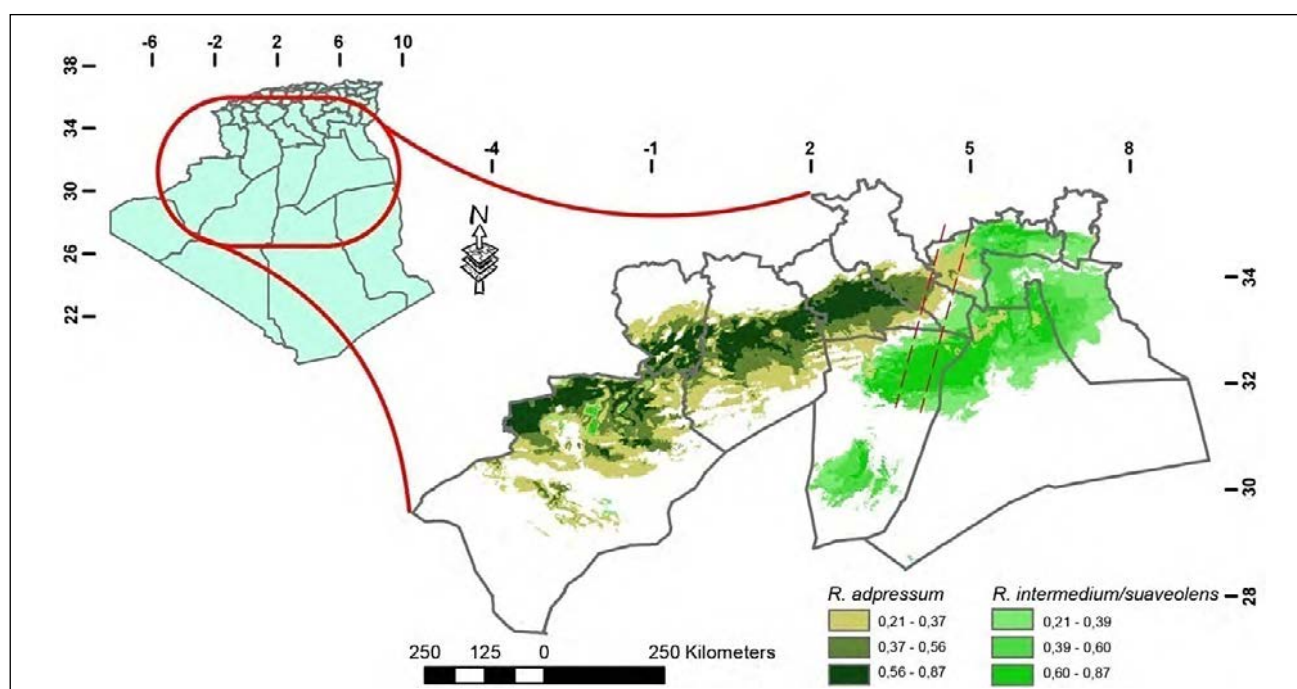


Fig. 1. Distribution models of *R. adpressum* and *R. intermedium/suaveolens*. Red lines show the areas of the hybrid species.

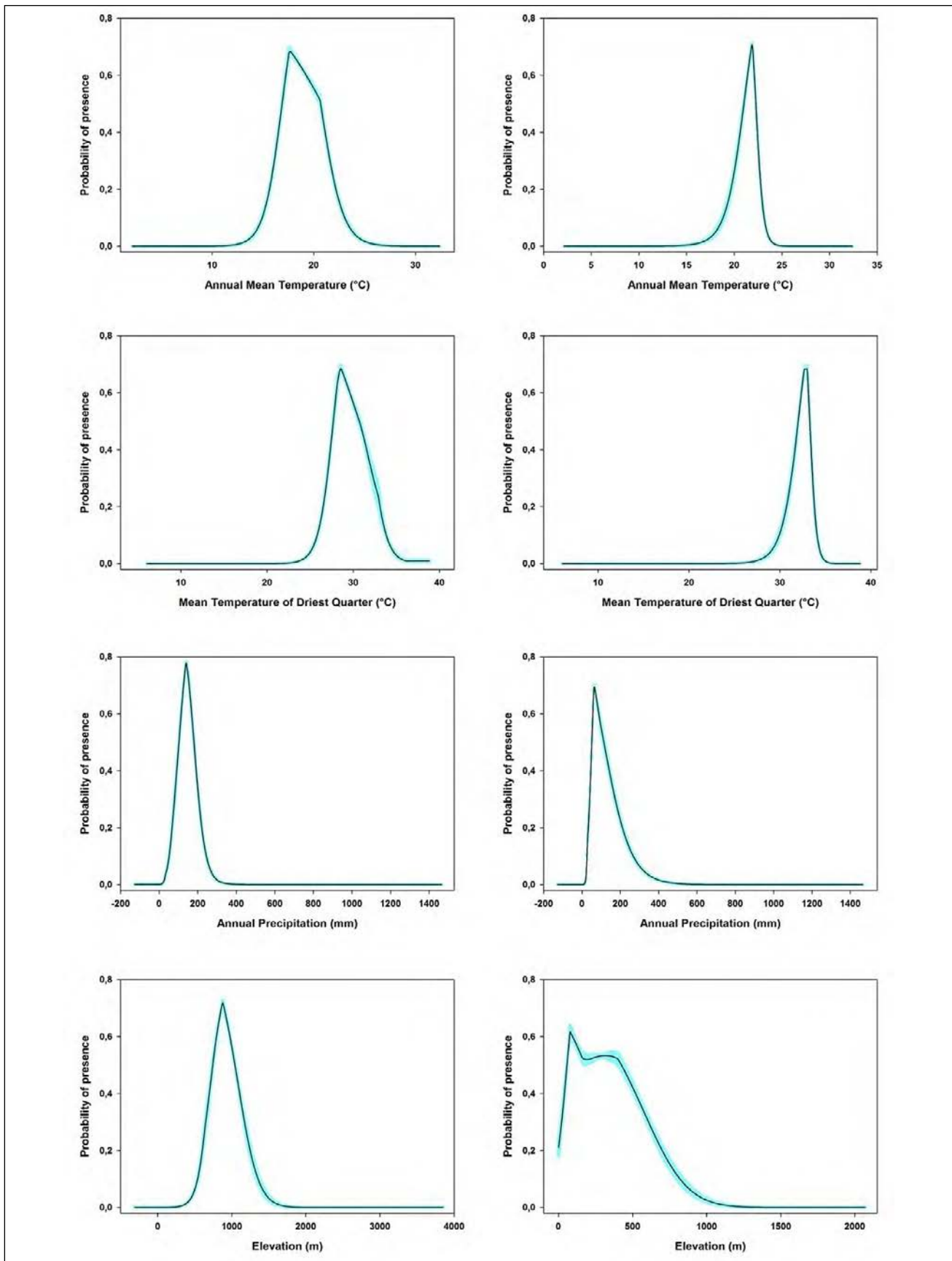


Fig. 2. Response curves of *R. adpressum* (left) and *R. intermedium/suaveolens* (right) to four environmental predictors.

Table 2. Mean values of bioclimatic variables characterizing habitat preference of *R. adpressum* and *R. intermedium/suaveolens* species, with their standard deviations.

	<i>R.</i> <i>adpressum</i>	<i>R.</i> <i>intermedium/</i> <i>suaveolens</i>
Annual mean temperature (°C)	18.65±1.19	21.61±0.44
Annual mean diurnal range (°C)	13.34±0.26	13.03±0.48
Isothermality (%)	35.80±0.92	34.53±1.34
Temperature seasonality (coefficient of variation) (%)	841.05±16.31	860.40±12.28
Max temperature of warmest month (°C)	36.36±1.18	39.91±1.06
Min temperature of coldest month (°C)	-0.08±1.02	2.91±0.38
Annual temperature range (°C)	36.76±0.54	36.73±0.73
Mean temperature of wettest quarter (°C)	16.89±1.46	12.44±0.49
Mean temperature of driest quarter(°C)	29.08±0.88	32.65±0.37
Mean temperature of warmest quarter (°C)	28.95±0.99	32.50±0.48
Mean temperature of coldest quarter (°C)	8.35±0.88	11.34±0.32
Annual precipitation (mm)	140.72±25.26	86.62±19.75
Precipitation of wettest month (mm)	18.27±3.01	11.42±2.15
Precipitation of driest month (mm)	2.89±1.08	1.63±0.75
Precipitation seasonality (coefficient of variation) (%)	34.70±6.38	43.83±2.28
Precipitation of wettest quarter (mm)	49.02±7.70	26.38±4.89
Precipitation of driest quarter (mm)	16.58±6.27	6.70±1.94
Precipitation of warmest quarter (mm)	16.97±6.74	5.05±1.36
Precipitation of coldest quarter (mm)	38.78±7.74	21.69±4.45
Elevation (m)	888.74±94.89	255.18±114.52

presence. Contrary to the annual precipitation, where the areas of *R. adpressum* are rainier than those of the other two species. Despite the difference in climatic factors in both zones, the elevation factor shows distinctive variance between these species: *R. adpressum* in the West prefers high altitudes, contrary to *R. intermedium/suaveolens*, which prefer low altitudes.

Generally, the habitats of *R. adpressum* occupy characteristically an average altitude of 888.74 m (SD=94.89 m), with a mean annual temperature of 18.65 °C (SD=1.19 °C) and annual precipitation of 140.72 mm (SD=25.26 mm). The habitats of *R. intermedium/suaveolens* species occupy characteristically an average altitude of 255.18 m (SD=114.52 m), with a mean annual temperature of 21.61 °C (SD=0.44 °C) and annual precipitation of 86.62 mm (SD=19.75 mm).

Discussion

The results show two distinct distribution areas, the first for *R. adpressum* in the Northwest and the second in the Northeast Algeria for *R. suaveolens*, with a meet-

ing zone between the two for the hybrid species *R. intermedium*, with its high morphological variability, as compared to the two typical species *R. adpressum* and *R. suaveolens*. On the basis of specimens stored in the National Museum of Natural History of France, Wiklund (1986) detailed the comparative descriptions of these three species and suggested a distribution map similar to the models obtained by MaxEnt (Fig. 1). According to his measurements, he saw specimens within the hybrid species, which were intermediate or close to one of the other two species. He also pointed to the fact that similar variation might appear without hybridization in zones subject to great ecological changes, which were thus similar to zones of intergradation. These zones resulted from an environmental gradient (longitudinal and altitudinal in this study). They were formed *in situ* by primary intergradation or by secondary contact between populations that diverged allopatrically. However, the origin of such formation could not be determined easily (Abbott 2017).

The two species *R. adpressum* and *R. suaveolens* are distributed in regions classified as sub-Mediterranean semidesert grasslands and shrublands, and seldom in desert areas. According to the the aridity index (AI), these areas can be arid for *R. adpressum* (AI=0.10±0.05) and hyperarid for *R. suaveolens* (AI=0.05±0.03). It appears from the results that the two zones have different climatic characteristics in addition to the altitude factor, which differs significantly. According to Wiklund (1986), the overlapping of these two zones (red lines in Fig. 1) shows in progression a complete separation of the two zones, placing *R. adpressum* and *R. suaveolens* species in an allopatric model of speciation.

There are two mechanisms, by which the climate can lead to speciation: niche divergence and niche conservatism. In the first case, several populations occupy different habitats and differences in climatic conditions would impose divergence over time. In the second case, for allopatric populations, climate differences in space could serve as a dispersal barrier and the incipient species would adapt and tolerate the new conditions (Wiens 2004). Niche conservatism could be an important aspect of speciation, especially under long-term climate changes (Hua & Wiens 2013).

The relationship between elevation or altitudinal gradient and speciation has been widely discussed (Steinbauer & al. 2016, 2017). Furthermore, large areas additionally increase the probabilities of speciation and allopatric divergence (Losos & Schluter 2000).

In this study, the intrinsic ecological factors are limiting variables for the distribution areas of *R. adpressum* and *R. suaveolens* species. However it is important to report the impact of other abiotic or biotic factors, such as soil properties, competition and tolerance of cold, and the consideration that perennial plants may develop resistance to suboptimal environmental conditions (Wiens 2004; Aguilée & al. 2018; AitMouheb & al. 2018).

In this study, habitat suitability modeling differentiated the distribution areas of *R. adpressum* and *R. suaveolens* species and showed the meeting areas, where the hybrid species *R. intermedium* was found. With the response curves of the species to bioclimatic factors, habitat preferences of these species have been analyzed. Distinction of the hybrid zone is an important step for future genetic or ecological studies that would contribute to understanding the isolation and speciation mechanisms, considering these zones as "natural laboratories for evolutionary studies" and "windows on evolutionary process".

Acknowledgment. The authors extend their warm gratitude to Mr. Sebgaoui AbdelKader, Mr. Sebgaoui Faïçal and Prof. Naima Khatir for their great help.

References

- Abbott, R.J. 2017. Plant speciation across environmental gradients and the occurrence and nature of hybrid zones. – J. Syst. Evol., 55(4): 238-258.
- Aguilée, R., Gascuel, F., Lambert, A. & Ferriere, R. 2018. Clade diversification dynamics and the biotic and abiotic controls of speciation and extinction rates. – Nat. Commun., 9(1): 3013.
- AitMouheb, H., Kadik, L., Albert, C.H., Berrached, R. & Prinzing, A. 2018. How do steppe plants follow their optimal environmental conditions or persist under suboptimal conditions? The differing strategies of annuals and perennials. – Ecol. Evol., 8(1): 135-149.
- Boussoussa, H., Khacheba, I., Djeridane, A., Mellah, N. & Yousfi, M. 2016. Antibacterial activity from *Rhanterium adpressum* flower extracts, depending on seasonal variations. – Ind. Crop. Prod., 83: 44-47.
- Chehama, A. & Youcef, F. 2009. Variations saisonnières des caractéristiques floristiques et de la composition chimique des parcours sahariens du Sud-Est algérien. – Sécheresse, 20(4): 373-381.
- Chemsas, A.E., Erol, E., Öztürk, M., Zellagui, A., Özgür, C., Gherraf, N. & Duru, M.E. 2016. Chemical constituents of essential oil of endemic *Rhanterium suaveolens* Desf. growing in Algerian Sahara, with antibiofilm, antioxidant and anticholinesterase activities. – Nat. Prod. Res., 30(18): 2120-2124.
- Elhouiti, F., Tahri, D., Takhi, D., Ouinten, M., Barreau, C., Verdal-Bonnin, M.N., Bombarda, I. & Yousfi, M. 2017. Variability of composition and effects of essential oils from *Rhanterium adpressum* Coss. & Durieu against mycotoxinogenic *Fusarium* strains. – Arch. Microbiol., 199(10): 1345-1356.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E. & Yates, C.J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. – Diversity & Distrib., 17(1): 43-57.
- Gauthier-Pilters, H. 1961. Observations sur l'écologie du dromadaire dans le Sahara nord-occidental. – Mammalia, 25(2): 195-280.
- Graham, C.H. & Hijmans, R.J. 2006. A comparison of methods for mapping species ranges and species richness. – Glob. Ecol. Biogeogr., 15(6): 578-587.
- Hamia, C., Gourine, N., Boussoussa, H., Saidi, M., Gaydou, E.M. & Yousfi, M. 2013. Chemical composition and antioxidant activity of the essential oil and fatty acids of the flowers of *Rhanterium adpressum*. – Nat. Prod. Commun., 8: 1-4.
- Hua, X. & Wiens, J.J. 2013. How does climate influence speciation? – Am. Natur., 182(1): 1-12.
- Losos, J.B. & Schluter, D. 2000. Analysis of an evolutionary species-area relationship. – Nature, 408(6814): 847.
- Ozenda, P. 2004. Flore et végétation du Sahara. 3ed. CNRS éditions. Paris.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. & Schapire, R.E. 2006. Maximum entropy modeling of the species geographic distributions. – Model. Ecol., 190(3-4): 231-259.
- Pramanik, M., Paudel, U., Mondal, B., Chakraborti, S. & Deb, P. 2018. Predicting climate change impacts on the distribution of the threatened *Garcinia indica* in the Western Ghats, India. – Clim. Risk Manag., 19: 94-105.
- Steinbauer, M.J., Field, R., Grytnes, J.A., Trigas, P., Ah-Peng, C., Attorre, F. & De Sanctis, M. 2016. Topography-driven isolation, speciation and global increase of endemism with elevation. – Glob. Ecol. Biogeogr., 25(9): 1097-1107.
- Steinbauer, M.J., Irl, S.D., González-Mancebo, J.M., Breiner, F.T., Hernández-Hernández, R., Hopfenmüller, S. & Beierkuhnlein, C. 2017. Plant invasion and speciation along elevational gradients on the oceanic island La Palma, Canary Islands. – Ecol. Evol., 7(2): 771-779.
- Thompson, I., Mackey, B., McNulty, S. & Mosseler, A. 2009. A Synthesis of the Biodiversity/Resilience/Stability Relationship in Forest Ecosystems. Forest Resilience, Biodiversity, and Climate Change. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, pp. 67 technical series 43.
- Thuiller, W., Lavorel, S. & Araújo, M.B. 2005. Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. – Glob. Ecol. Biogeogr., 14(4): 347-357.
- Wiens, J.J. 2004. Speciation and ecology revisited: phylogenetic niche conservatism and the origin of species. – Evolution, 58(1): 193-197.
- Wiklund, A. 1986. The genus *Rhanterium* (Asteraceae: Inuleae). – J. Linn. Soc., Bot., 93(2): 231-246.

Algerian *Inuleae* tribe species distribution modeling under influence of current and future climate conditions

Djilali Tahri*, Fatiha Elhouiti, Mohamed Quinten & Mohamed Yousfi

Laboratoire des Sciences Fondamentales à l'Université Amar Telidji de Laghouat, Route de Ghardaïa BP37G (03000), Laghouat, Algérie; ORCID: DT <https://orcid.org/0000-0002-9408-6188>, FE <https://orcid.org/0000-0001-8191-1428>

*corresponding author (d.tahri@lagh-univ.dz)

Abstract. This study aims to predict the impact of bioclimatic variables in current and future climatic scenarios on the distribution of *Inuleae* tribe species. Modeling the distribution of 30 species of the *Inuleae* tribe in Algeria was carried out with a maximum entropy model. Two models with 99 occurrence points were obtained with mean values of Area Under a Curve (AUC) of 0.987 ± 0.01 and 0.971 ± 0.02 , reflecting excellent predictive power. Three bioclimatic variables contributed mainly to the first model and four - to the second one with cumulative contributions of 83.8% and 79%, respectively elucidating differences between species of the two major climatic zones in Algeria: the Tell and the Sahara. Two-dimensional niches of Algerian *Inuleae* species allowed to distinguish these two groups with the distribution of 18 Tell species, characterized by high rainfall (14-18°C, 400-1000 mm) and the other 12 species – distributed in hot and dry environments (17-24°C, 20-200 mm). Modeling the distribution under future conditions showed that habitats of the Saharan region would be much less suitable for these species with a variation in the annual mean temperature increase up to 20% and a decrease in annual precipitation, which could raise to 11 and 15%.

Key words: *Inuleae*, species distribution model, Algerian Tell and Sahara, Maximum entropy, RCP scenarios

1. Introduction

In recent years, prediction and mapping of favorable habitats and potential distributions of species have become important in biogeography and ecology to assess: the impact of climate change and to identify species collection areas or zones suitable for forest production (Elith *et al.* 2011; Pramanik *et al.* 2018); reasons why modeling tools of distribution of species have become much more popular and used in ecology and its applications; if generated models will establish relationships between the occurrence of species and the environmental and biophysical conditions of the study areas (Rodrigues *et al.* 2015; Pramanik *et al.* 2018); if this will help define the niche from the environmental values corresponding to presence points and calculate similarities between environmental values in a given raster cell as well as that of the niche of modeled species (Khanum *et al.* 2013; Pramanik *et al.* 2018).

Inuleae tribe (Asteraceae) comprises about 66 genera and approximately 690 species of which its

largest genera are: *Inula* and *Pulicaria* (Nylinder & Anderberg 2015). Studies have focused on systematic aspects and phylogenetic relationships within this tribe (Osman 2006; Torices & Anderberg 2009; Nylinder & Anderberg 2015), while the distribution and habitat of their species have not yet been studied despite the importance and influence of climatic, environmental and biophysical factors on the distribution of species and inter/intra specific genetic or chemical variations.

Algerian studies on *Inuleae* tribe species focused much more on biochemical aspects by extraction and identification of secondary metabolites such as essential oils, phenols and lipids (Belloum *et al.* 2013; Belyagoubi-Benhammou *et al.* 2014; Elhouiti *et al.* 2017; Benomari *et al.* 2019), and also by valorization of their biological activities. On the other hand, some studies of rediscovery (Babali & Bouazza 2016) and investigation by studying the vegetation associations (Benhouhou *et al.* 2003), biodiversity and phytogeography (Yahi *et al.* 2012; Chehma 2014) could elucidate some ecological aspects for this tribe.

Table 1. List of species studied with coordinates in decimal degrees and regions of occurrence in Algeria

Species	Longitude	Latitude	Region
<i>Chiliadenus rupestris</i> (Pomel) S. Brullo	-1.40247	34.89764	Ghar Rouban (Tlemcen)
<i>Chiliadenus rupestris</i> (Pomel) S. Brullo	-1.7816	34.5994	Ghar Rouban (Tlemcen)
<i>Chiliadenus rupestris</i> (Pomel) S. Brullo	-1.72855	34.87675	Maghnia (Tlemcen)
<i>Chiliadenus rupestris</i> (Pomel) S. Brullo	-1.2674	34.89286	Tlemcen
<i>Chiliadenus rupestris</i> (Pomel) S. Brullo	-1.83914	35.08956	Ghazaouet (Tlemcen)
<i>Pulicaria vulgaris</i> Gaertn.	6.73119	35.35747	Aurès (Batna)
<i>Pulicaria vulgaris</i> Gaertn.	3.4522	36.73817	Corso (Boumerdès)
<i>Pulicaria vulgaris</i> subsp. <i>pomeliana</i> (Faure & Maire) E. Gamal-Eldin	2.72894	36.61338	Chaïba (Tipaza)
<i>Pulicaria vulgaris</i> subsp. <i>pomeliana</i> (Faure & Maire) E. Gamal-Eldin	-1.34664	34.78933	Terni (Tlemcen)
<i>Pulicaria filaginoides</i> Pomel	-0.46329	35.70149	Hassi Aneur (Oran)
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	-1.91643	31.96824	Djebel Antar (Béchar)
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	-1.50204	32.09525	Djebel Grouz (Béchar)
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	1.02224	33.72799	Djebel Mekter (Aïnsefra)
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	-0.11656	32.77047	Djebel Aïssa (Naâma)
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	-0.87994	32.47374	Djebel Mzi (Laghouat)
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	-0.43417	32.77896	Tiout (Naâma)
<i>Pulicaria mauritanica</i> Coss.	-0.61678	32.75719	Ain Saфра
<i>Pulicaria odora</i> (L.) Rechb.	5.01627	36.7528	Ain-Skhoun (Bejaïa)
<i>Pulicaria odora</i> (L.) Rechb.	4.62741	36.63326	Akfadou (Bejaïa)
<i>Pulicaria odora</i> (L.) Rechb.	1.35694	35.40912	Djebel Saffalou (Tiaret)
<i>Pulicaria odora</i> (L.) Rechb.	4.61342	36.59082	Djenane (Bejaïa)
<i>Pulicaria arabica</i> (L.) Cass.	4.4668	35.68513	M'sila
<i>Pulicaria arabica</i> (L.) Cass.	3.67832	36.70722	Issers (Boumerdès)
<i>Pulicaria sicula</i> (L.) Moris	3.33087	36.75091	Reghaïa (Alger)
<i>Pulicaria sicula</i> (L.) Moris	2.95979	36.52166	Mitidja
<i>Pulicaria sicula</i> (L.) Moris	5.34871	36.32616	Djebel Mégriss (Sétif)
<i>Pulicaria sicula</i> (L.) Moris	8.43115	36.86968	Calle
<i>Pulicaria sicula</i> (L.) Moris	6.86997	36.86215	Skikda
<i>Pulicaria sicula</i> (L.) Moris	6.69153	36.37591	Canstantine
<i>Pulicaria sicula</i> (L.) Moris	7.71798	36.92448	Annaba
<i>Pulicaria uniseriata</i> N.Kilian	3.67626	36.68864	Issers (Boumerdès)
<i>Pulicaria uniseriata</i> N.Kilian	4.20169	36.63371	Larbaâ Nath Irathen (TiziOuzou)
<i>Pulicaria uniseriata</i> N.Kilian	4.1703	36.37291	El Adjiba (Bouira)
<i>Francoeuria crispa</i> (Forsk.) Cass.	3.70544	32.50244	Anit el Chebrog (Ghardaïa)
<i>Francoeuria crispa</i> (Forsk.) Cass.	4.43676	32.7375	El Guerrara (Ghardaïa)
<i>Francoeuria laciniata</i> Coss. & Dur.	5.76851	34.89652	Biskra
<i>Francoeuria laciniata</i> Coss. & Dur.	3.02982	33.66252	Laghouat
<i>Perralderia coronopifolia</i> Coss.	4.16485	32.17143	Oued Metlili (Ghardaïa)
<i>Perralderia coronopifolia</i> Coss.	3.58789	32.48972	Ghardaïa
<i>Perralderia coronopifolia</i> Coss.	3.77784	32.85029	Berrain (Ghardaïa)
<i>Perralderia coronopifolia</i> Coss.	-3.28989	29.46076	Tabelbala (Béchar)
<i>Perralderia coronopifolia</i> Coss.	7.92904	25.68039	Tassili n'Ajjer (Illizi)
<i>Perralderia coronopifolia</i> subsp. <i>purpurascens</i> (Coss.) Maire	4.15335	32.40309	Zelfana (Ghardaïa)
<i>Perralderia coronopifolia</i> subsp. <i>purpurascens</i> (Coss.) Maire	-0.58867	32.51271	Moghrar-Tahtani (Naâma)
<i>Dittrichia graveolens</i> (L.) W. Greuter	2.97073	36.71823	Alger
<i>Dittrichia viscosa</i> subsp. <i>viscosa</i> (L.) Greuter	-0.49456	35.64217	Oran
<i>Dittrichia viscosa</i> subsp. <i>viscosa</i> (L.) Greuter	3.13029	36.68926	Sidi-Rzine (Alger)
<i>Dittrichia viscosa</i> subsp. <i>viscosa</i> (L.) Greuter	5.49387	36.60043	Taza (Jijel)
<i>Dittrichia viscosa</i> subsp. <i>viscosa</i> (L.) Greuter	-1.39243	34.7389	Forêt d' Hafir (Tlemcen)
<i>Dittrichia viscosa</i> subsp. <i>viscosa</i> (L.) Greuter	-0.54691	32.90369	Ain Saфра
<i>Inula montana</i> Bal. & Bourg. ex Boiss.	-0.85213	33.03261	Ain Saфра
<i>Inula montana</i> Bal. & Bourg. ex Boiss.	-1.39346	34.75146	Forêt d' Hafir (Tlemcen)
<i>Inula obtusifolia</i> A. Kerner	8.4702	36.88495	Calle
<i>Inula conyzae</i> (Griess.) DC.	5.62131	36.6666	Selma ben Ziada (Jijel)
<i>Limbarda crithmoides</i> subsp. <i>crithmoides</i> (L.) Dumort.	-1.45828	35.28836	Rachgoun (Aïn Témouchent)
<i>Limbarda crithmoides</i> subsp. <i>crithmoides</i> (L.) Dumort.	-1.99217	35.07235	Ouled Ben Ayad (Tlemcen)
<i>Limbarda crithmoides</i> subsp. <i>crithmoides</i> (L.) Dumort.	2.77761	36.67095	Douaouda (Tipaza)
<i>Limbarda crithmoides</i> subsp. <i>crithmoides</i> (L.) Dumort.	-1.38058	35.30673	Beni Saf (Aïn Témouchent)

<i>Limbarda crithmoides</i> subsp. <i>crithmoides</i> (L.) Dumort.	-1.30435	35.28212	Sid Safi (Aïn Témouchent)
<i>Limbarda crithmoides</i> subsp. <i>crithmoides</i> (L.) Dumort.	5.48782	36.59919	Taza (Jijel)
<i>Gymnarrhena micrantha</i> Desf.	3.7096	32.57852	Ghardaïa
<i>Gymnarrhena micrantha</i> Desf.	-2.07659	31.00875	Oued Menouaaraar (Béchar)
<i>Pulicaria crispa</i> (Forsk.) Benth. exOliv.	7.94518	25.76873	Tassili n'Ajjer (Illizi)
<i>Pulicaria crispa</i> (Forsk.) Benth. exOliv.	5.6123	33.43648	Touggourt (Ouargla)
<i>Pulicaria crispa</i> (Forsk.) Benth. exOliv.	-2.08345	31.05934	Oued Menouaaraar (Béchar)
<i>Rhantherium adpressum</i> (Desf.) Coss. & Dur.	5.63427	34.87342	Djebel Maaouia (Biskra)
<i>Rhantherium adpressum</i> (Desf.) Coss. & Dur.	-0.62553	32.67614	Ain Saфра
<i>Rhantherium adpressum</i> (Desf.) Coss. & Dur.	3.73201	32.86528	Berraian (Ghardaïa)
<i>Rhantherium adpressum</i> (Desf.) Coss. & Dur.	2.7969	33.65143	Laghout
<i>Rhantherium adpressum</i> (Desf.) Coss. & Dur.	2.8817	30.5958	Goléa (Ghardaïa)
<i>Rhantherium adpressum</i> (Desf.) Coss. & Dur.	5.3419	31.9628	Ouargla
<i>Rhantherium adpressum</i> (Desf.) Coss. & Dur.	4.2261	32.3961	Zelfana (Ghardaïa)
<i>Asteriscus graveolens</i> (Forssk.) Less.	3.63897	32.47049	Ghardaïa
<i>Asteriscus graveolens</i> (Forssk.) Less.	4.6426	32.7901	Guerrara (Ghardaïa)
<i>Asteriscus graveolens</i> (Forssk.) Less.	9.48721	24.52457	Djanet (Illizi)
<i>Asteriscus graveolens</i> (Forssk.) Less.	5.53505	31.74428	Ouargla
<i>Asteriscus maritimus</i> (L.) Less.	-1.98393	35.07214	Ouled Ben Ayad (Tlemcen)
<i>Asteriscus maritimus</i> (L.) Less.	-1.40241	35.2996	Beni Saf (Aïn Témouchent)
<i>Asteriscus maritimus</i> (L.) Less.	-1.35026	35.2975	Sid Safi (Aïn Témouchent)
<i>Asteriscus maritimus</i> (L.) Less.	-1.35397	34.74313	Forêt d' Hafir (Tlemcen)
<i>Asteriscus aquaticus</i> (L.) Less.	3.58868	36.59207	Lakhdaria (Bouira)
<i>Asteriscus aquaticus</i> (L.) Less.	1.34214	36.10415	Chélif
<i>Asteriscus aquaticus</i> (L.) Less.	2.79375	36.29277	Médéa
<i>Asteriscus aquaticus</i> (L.) Less.	4.89193	36.08251	Bibans (Bordj Bou Arreridj)
<i>Asteriscus pygmaeus</i> (DC.) Coss. & Dur.	3.82333	35.0138	Mergueb (M'sila)
<i>Asteriscus pygmaeus</i> (DC.) Coss. & Dur.	3.67441	32.44019	Ghardaïa
<i>Asteriscus pygmaeus</i> (DC.) Coss. & Dur.	-0.716	33.26763	Aïn Ben-Khellil (Naâma)
<i>Asteriscus pygmaeus</i> (DC.) Coss. & Dur.	-0.75565	32.71382	Ain Saфра
<i>Anvillea garcinii</i> subsp. <i>radiata</i> (Coss. & Dur.) A. Anderberg	3.517	30.02819	Goléa (Ghardaïa)
<i>Anvillea garcinii</i> subsp. <i>radiata</i> (Coss. & Dur.) A. Anderberg	-0.343	32.4601	Ain Saфра
<i>Anvillea garcinii</i> subsp. <i>radiata</i> (Coss. & Dur.) A. Anderberg	-2.45583	31.91252	Boukaïs (Béchar)
<i>Anvillea garcinii</i> subsp. <i>radiata</i> (Coss. & Dur.) A. Anderberg	-2.2749	31.94516	Lahmar (Béchar)
<i>Anvillea garcinii</i> subsp. <i>radiata</i> (Coss. & Dur.) A. Anderberg	8.31047	26.12683	Tassili n'Ajjer (Illizi)
<i>Pulicaria vulgaris</i> subsp. <i>vulgaris</i> Gaertn.	3.45303	36.74978	Corso (Boumerdès)
<i>Pulicaria vulgaris</i> subsp. <i>vulgaris</i> Gaertn.	3.34246	36.7681	Reghaia (Alger)
<i>Pulicaria clausonis</i> Pomel	2.71375	36.61503	Chaïba (Tipaza)
<i>Pulicaria clausonis</i> Pomel	2.70025	36.63756	Boulmaïl (Tipaza)
<i>Pulicaria undulata</i> (L.) C.A.Mey.	9.46086	24.56052	Djanet (Illizi)
<i>Pulicaria undulata</i> (L.) C.A.Mey.	8.04268	26.01828	Tassili n'Ajjer (Illizi)

Representative Concentration Pathways (RCP) are scenarios developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and used to model future climate taking into consideration volume of greenhouse gases emitted, air pollutants and land-use change. Models are generated to predict future climatic conditions and, based on these General Circulation Models (GCM), climate layers were established to help model the impact of climate change on species distribution (Van Vuuren *et al.* 2011).

The objective of this study was to predict, by modeling the ecological niche, the distribution of *Inuleae* tribe species reported present in Algeria under the effect of different climatic conditions in order to be able to determine actual niches and factors influencing this distribution.

2. Materials and methods

Points of presence were extracted from the digitized herbarium of the National Museum of Natural History of France (MNHN) (<https://science.mnhn.fr/institution/mnhn/collection/p/item/search/>) and Algerian studies, which take *Inuleae* species as objects of study, with a total of 99 points of presence for 30 species and subspecies (Table 1). The search for these species was based, first, on the work of Battandier & Trabut (1888), followed by verification of scientific names in the “Catalogue of life checklist” (<http://www.catalogueoflife.org/annual-checklist/2018/search/all>). Geoplaner website (<https://www.geoplaner.com/>) was used to geo-reference herbarium records; coordinates of

locations were checked following Hijmans *et al.* (1999) and are considered to be correct.

Climate data were downloaded from WorldClim Version 2 (<http://www.worldclim.org/>) (Fick & Hijmans 2017), these were mean monthly data of minimum, mean and maximum temperature and precipitation of 1970–2000 available at a spatial resolution of ~1 km (30 seconds). A total of 19 WorldClim bioclimatic variables derived from monthly climate data were used in predicting the potential distribution of *Inuleae* tribe species. Some of them were basic climatic parameters; others incorporated seasonal aspects and others for limiting environmental factors.

Inuleae tribe species distribution and habitat assessment were determined by the maximum entropy method (MaxEnt version 3.4.1) (Phillips *et al.* 2006) with its very good performance, especially regarding small samples (Elith *et al.* 2006). MaxEnt uses presence data to calculate the effective niche and probability of occurrence of a species based on the maximum entropy theory. According to the two zones; Tell or Sahara, two distribution models were run with max iteration at 500, regularization multiplier in default value (1), and in logistic ASC output format. The rest of the setting in these models was used as default.

The MaxEnt results presented constitute the mean of 10 randomized replications for each model. The Jackknife test was performed to measure the importance

of each variable in the models. Predictive power of the models was evaluated by Area under a curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve for presence records that were divided into 80% training and 20% test data. To predict habitat suitability under future conditions, a climate projection was made up to 2070 with Community Climate System Model (CCSM) data at 30 seconds resolution for all greenhouse gas emission scenarios: RCP 2.6, 4.5, 6.0 and 8.5 applying 10 percentile training presence threshold rule.

3. Results

3.1. Distribution in present climate conditions:

Two distribution models were obtained for the Tell (model 1) and Sahara (model 2) species. AUC training mean values of the 10 replications were 0.987 ± 0.01 and 0.971 ± 0.02 , respectively, indicating very good performance in comparison with randomly generated models. The obtained potential distribution models are shown in Fig. 1. MaxEnt results indicate that highly contributing environmental variables in model 1 (Table 2) were BIO19 (precipitation of coldest quarter) with 66.1%, BIO18 (precipitation of the warmest quarter) with 10%, BIO17 (precipitation of the driest quarter) with 12.8%. On the other hand, variables with a high contribution in model 2 were BIO4 (temperature

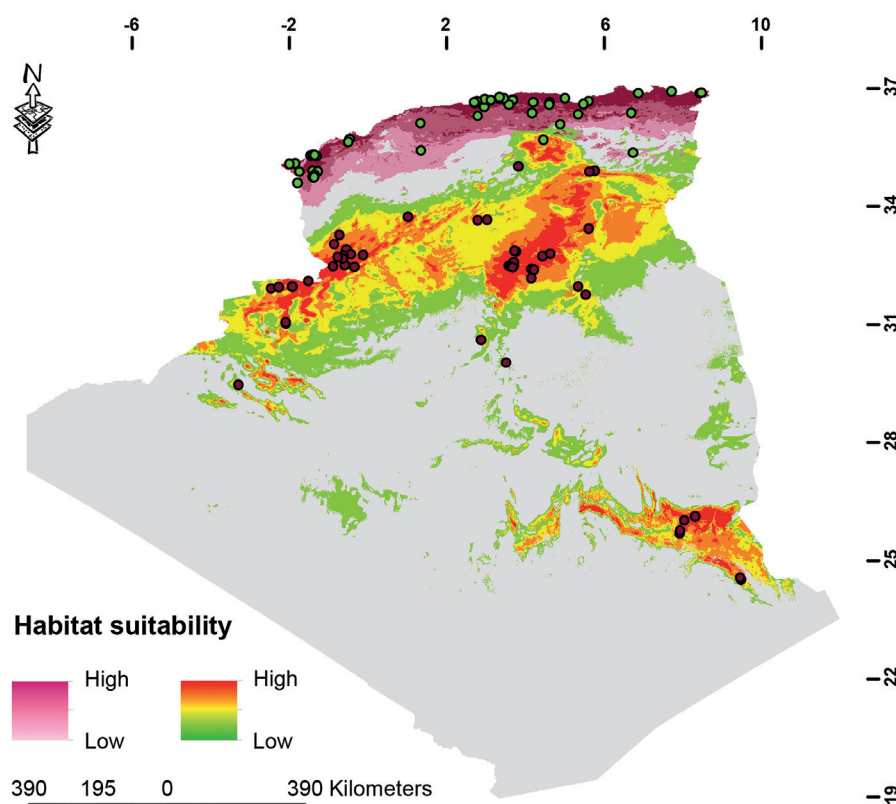


Fig. 1. Prediction model of potential distribution of the *Inuleae* tribe species in Algeria

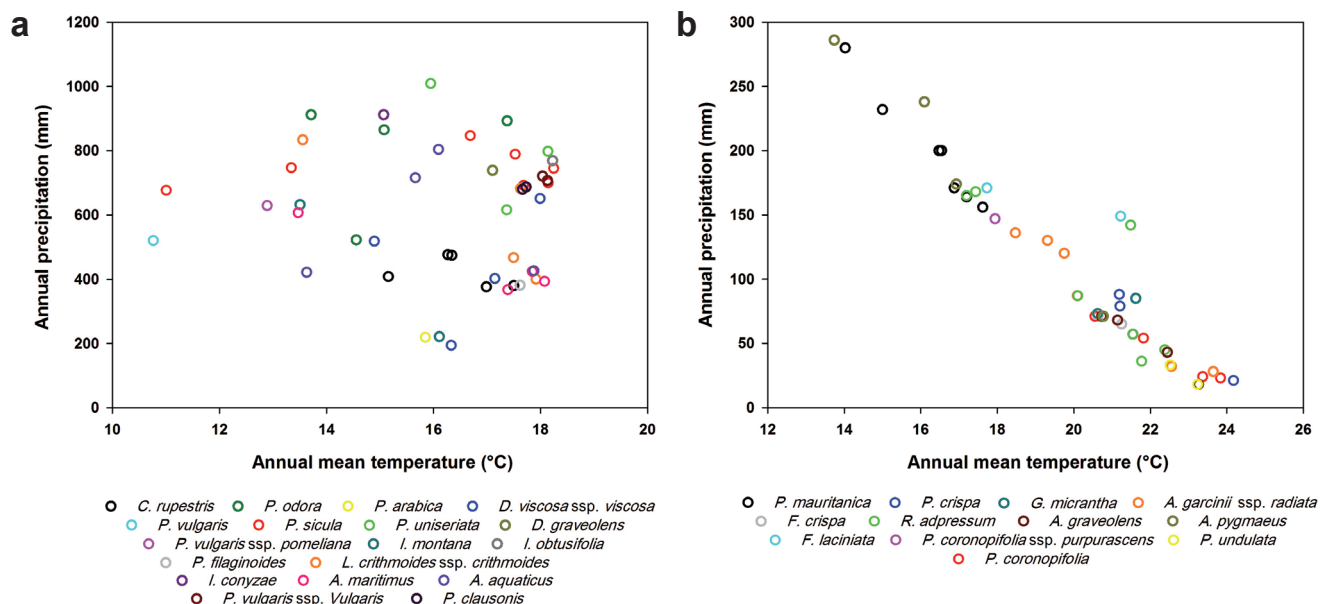
Table 2. Relative contributions and permutation importance of the bioclimatic variables in MaxEnt models, the values are the means of 10 replications, Jackknife tests values expressed as AUC for models using each variable alone

Variable	Tell			Sahara		
	Percent contribution	Permutation importance	Jackknife of AUC	Percent contribution	Permutation importance	Jackknife of AUC
BIO1 (Annual Mean Temperature)	0.2	7.3	0.92	0	0	0.70
BIO2 (Annual Mean Diurnal Range)	4.9	4.5	0.94	20.7	20.4	0.89
BIO3 (Isothermality (BIO1/BIO7)*100)	0.1	0.1	0.66	5.7	1	0.92
BIO4 (Temperature Seasonality (Standard Deviation))	0.6	2.6	0.86	33.1	40.9	0.77
BIO5 (Max Temperature of Warmest Month)	1.2	14.6	0.90	0	0	0.84
BIO6 (Min Temperature of Coldest Month)	2.5	9.6	0.74	0.1	0.1	0.60
BIO7 (Annual Temperature Range (BIO5-BIO6))	0.6	0.1	0.91	3.1	3.8	0.70
BIO8 (Mean Temperature of Wettest Quarter)	0.3	8.5	0.87	2	6.9	0.77
BIO9 (Mean Temperature of Driest Quarter)	0.1	0.5	0.85	3.5	4.8	0.85
BIO10 (Mean Temperature of Warmest Quarter)	0.6	21.1	0.91	0.5	0	0.76
BIO11 (Mean Temperature of Coldest Quarter)	0	0	0.80	0	0	0.70
BIO12 (Annual Precipitation)	1.5	0.1	0.95	0	0	0.71
BIO13 (Precipitation of Wettest Month)	0.3	0	0.95	0.2	0.3	0.64
BIO14 (Precipitation of Driest Month)	0.2	0.1	0.94	12.4	0	0.76
BIO15 (Precipitation Seasonality (coefficient of variation))	1.9	11.9	0.84	0.9	2.1	0.78
BIO16 (Precipitation of Wettest Quarter)	1.1	2.1	0.95	0	0	0.63
BIO17 (Precipitation of Driest Quarter)	7.7	0.9	0.92	12.8	0.6	0.81
BIO18 (Precipitation of Warmest Quarter)	10	15.4	0.92	0.7	9.6	0.56
BIO19 (Precipitation of Coldest Quarter)	66.1	0.5	0.95	4.4	9.4	0.79

seasonality) with 33.1%, BIO2 (annual mean diurnal range) with 20.7%, BIO17 (precipitation of the driest quarter) with 12.8% and BIO14 (precipitation of the driest month) with 12.4%. Cumulative contributions of these bioclimatic variables were 83.8% and 79% for the two models, respectively. The results of jackknife test

revealed that other parameters had more contribution for a higher AUC value like BIO2, BIO7, BIO12, BIO13, BIO14 and BIO16 for model 1 and BIO3, BIO9, BIO17 and BIO19 for model 2.

Effective niches of Tell species showed characteristics different from those of the Sahara (Fig. 2). Their mean

**Fig. 2.** Two-dimensional niches of various species of the Algerian tribe *Inuleae*

Explanations: a – the Tell species, b – the Sahara species

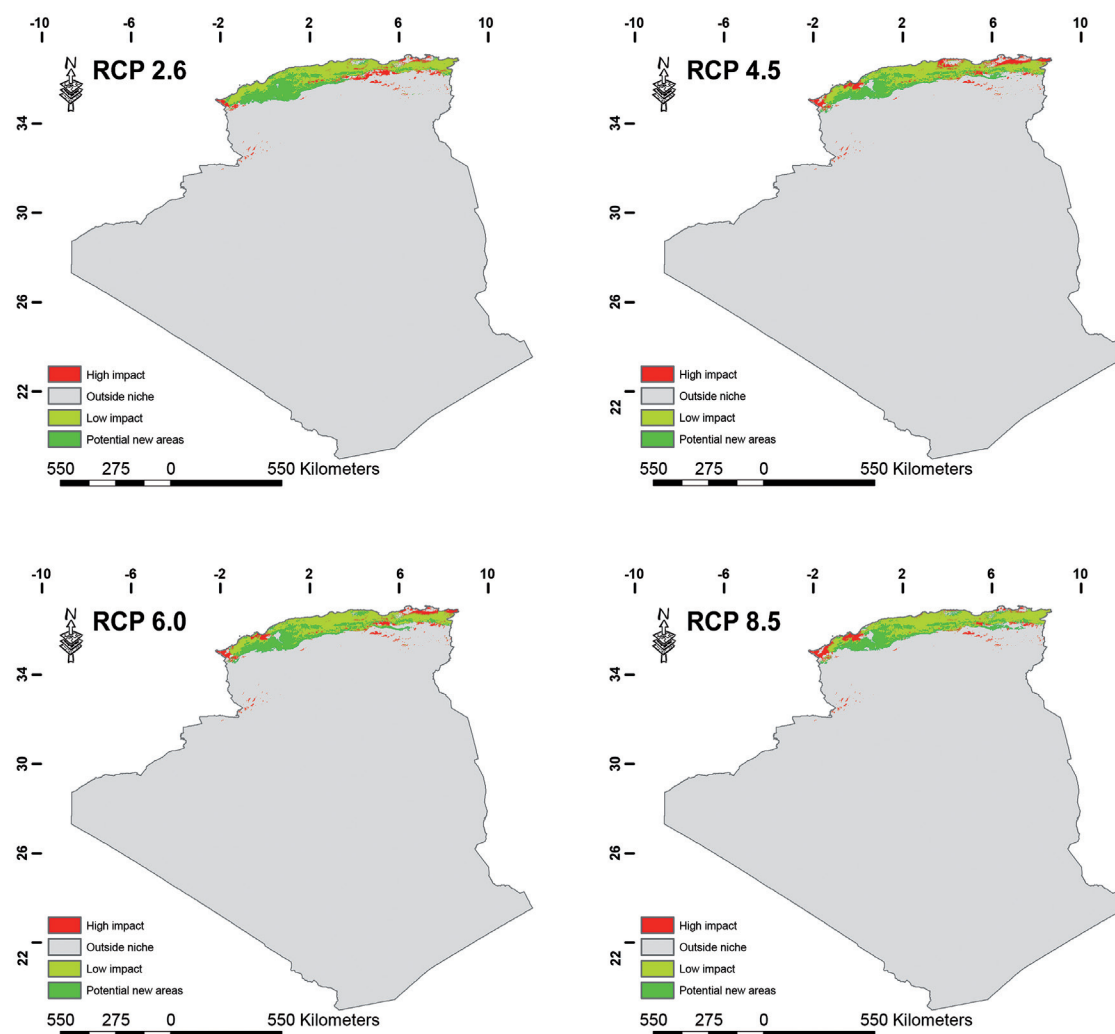


Fig. 3. Prediction of future habitat suitability for the Algerian *Inuleae* tribe species in the RCP climate scenarios

annual temperatures ranged from 14-18°C and the annual precipitation was 400-1000 mm. On the other hand, these characteristics extended from 17-24°C and from 20-200 mm for those of the Sahara. So the Tell species were restricted to temperate zones with a significant annual rainfall, while the climate niches of the Sahara species were limited to hot and dry environments.

These results shows that 12 species (*Pulicaria mauritanica* Coss., *Franciaurica crispa* (Forsk.) Cass., *Franciaurica laciniata* Coss. & Dur., *Perralderia coronopifolia* Coss., *Perralderia coronopifolia* subsp. *Purpurascens* (Coss.) Maire, *Gymnarhena micrantha* Desf., *Pulicaria crispa* (Forsk.) Benth. ex Oliv., *Rhanterium adpressum* (Desf.) Coss. & Dur., *Asteriscus graveolens* (Forssk.) Less., *Asteriscus pygmaeus* (DC.) Coss. & Dur., *Anvillea garcinii* subsp. *Radiata* (Coss. & Dur.) A. Anderberg, *Pulicaria undulate* (L.) C.A.Mey.) belonged to the climate niches of the Sahara, while 18 species (*Chiliadenus rupestris* (Pomel) S. Brullo, *Pulicaria filaginoides* Pomel, *Pulicaria Arabica* (L.)

Cass., *Dittrichia graveolens* (L.) W. Greuter, *Dittrichia viscosa* subsp. *Viscosa* (L.) Greuter, *Inula obtusifolia* A. Kerner, *Limbarda crithmoides* subsp. *Crithmoides* (L.) Dumort., *Asteriscus maritimus* (L.) Less., *Pulicaria vulgaris* subsp. *Vulgaris* (L.) Greuter, *Pulicaria clausonis* Pomel, *Pulicaria vulgaris* Gaertn., *Pulicaria vulgaris* subsp. *Pomeliana* (Faure & Maire) E. Gamal-Eldin, *Pulicaria odora* (L.) Rchb., *Pulicaria sicula* (L.) Moris, *Pulicaria uniseriata* N. Kilian, *Inula montana* Bal. & Bourg. ex Boiss., *Inula conyzae* (Griess.) DC., *Asteriscus aquaticus* (L.) Less.) belonged to the Tell zone. It was found that two genera *Asteriscus* (16 observations) and *Pulicaria* (37 observations) were able to cross the barrier between the Tell and the Sahara and adapt to different climatic conditions.

3.2. Distribution under influence of climate changes

Results of the distribution modeling of *Inuleae* tribe species in the four RCP scenarios are shown in Fig. 3. It turned out that habitats of these species were highly influenced by climate change, as arid and sub-Saharan

Table 3. Variations in areas and mean values of predicted changes of six bioclimatic variables influencing the distribution of the tribe *Inuleae* in the obtained models

	Tell					Sahara				
	Present	RCP				Present	RCP			
		2.6	4.5	6.0	8.5		2.6	4.5	6.0	8.5
Areas										
High impact areas (ha)	-	1114.7	1471.5	1185.4	1044.1	-	-	-	-	-
Low impact areas (ha)	-	4271.4	3914.6	4200.7	4342.1	-	-	-	-	-
Potential new areas (ha)	-	3227.5	3037.9	3144.9	3044.9	-	-	-	-	-
Factors										
Annual Mean Temperature (°C)	16.5	17.7	18.5	18.6	19.7	19.6	21.1	22.0	22.1	23.4
Mean Diurnal Range	8.9	9.0	9.2	9.2	9.2	14.0	14.1	14.2	14.2	14.2
Temperature Seasonality	581.1	585.1	593.1	592.9	616.8	810.8	802.4	826.9	822.1	849.8
Annual Precipitation (mm)	717.7	691.3	611.2	635.8	606.9	122.2	121.3	113.1	114.1	108.4
Precipitation Seasonality	65.5	62.9	65.3	63.0	64.1	51.6	45.9	47.8	47.9	50.2
Precipitation of Driest Quarter (mm)	29.7	30.3	23.7	27.4	23.4	13.5	13.8	12.9	12.9	11.5

species were most affected by these changes and the Tell species were affected by both these changes and the anthropogenic factor. Bioclimatic variables that contributed to current and future variation are presented in Table 3. The annual mean temperature increased between the models with a rate of variation reaching 20% as opposed to the annual precipitation where a decrease went up to 11 and 15%. The coefficient of temperature variation (temperature seasonality) expressed in percentage showed high variability in the two zones, a remark also noted for the precipitation seasonality, which represented an index as a percentage variation of this parameter. As a result, these changes affected the Sahara species most since they were in low-resource, which made their environments even more hostile.

For species in the Tell zone, large areas may have become potential new distribution areas (Table 3), but these areas decreased going from 2.6 to 8.5 scenario. On the other hand, low impact areas increased between these two scenarios, while climate alterations led to variations in high impact areas according to the four scenarios. High impact areas on *Inuleae* species expanded according to RCP 4.5 which can be interpreted by the increase in precipitation seasonality (65.3), decrease in the annual precipitation (611.2 mm) and increase in annual mean temperature (18.5°C). According to RCP 8.5, increase in temperature seasonality and decrease in annual precipitation decreased new potential areas of distribution and slightly influenced areas of current occurrence in comparison with the other scenarios.

4. Discussion

The MaxEnt model identified possible occurrences as sites where conditions were similar to those where

species naturally occurred using presence points. AUC mean values reflected significance and predictive power of the two generated models (Araújo *et al.* 2005). The models for predicted distribution of *Inuleae* tribe species represented in Fig. 1 show suitable habitats for Tell species in Northern Algeria and suitable habitats for Saharan species in central and southern Algeria as well as other habitats with low suitability, which were very low occurrence possibilities sites, taking into account limitations of dispersion such as geographical barriers (Tell atlas and Saharan Atlas) and anthropic pressure, which can affect species occurrence even under favorable climatic conditions (Stambouli-Meziane & Bouazza 2012; Sitayeb & Belabbes 2018).

It is clear that competition, dispersal, niche size, and spatiotemporal distribution of environmental conditions play a role in determining the repartition of species in relation to the distribution of favorable habitats. Pulliam (2000), discussed the fact that, according to the theory, species can be absent in a favorable habitat and present in an unfavorable habitat, which makes the concept of the real niche much broader than the fundamental niche.

By analyzing climatic niches of different species, two graphs (Fig. 2) represent two major characteristics in Algeria: the Tell and the Sahara. The Tell forms a band more than 100 km wide along the Mediterranean coast of Morocco, in the west, up to Tunisia; to the east, the Sahara is more extensive with sand dunes, plains and rocky plateaus (Beniston 1984).

Two mountain ranges cross Algeria from West to East – the Tell Atlas and the Saharan Atlas. Consequently, the topography of Algeria is made up of three important structures; Tell north of the Tell Atlas to the coast, Hautes Plaines between the Tell Atlas and the Saharan

Atlas and Sahara, which extends south of the Saharan Atlas representing more than 80% of the country. The Mediterranean climate covers the Tell, while the desert climate covers the South of Algeria (Despois & Raynal 1975).

Faced with climate change, species in arid and Saharan areas are more or less vulnerable given the specificity of habitats and characteristics of the history of their lives as long generation time, limited dispersal abilities and genetic diversity (Richardson *et al.* 2012), so these species will be faced with the challenge of quick adaption to survive in new conditions. Species responses to these changes differ from one another and consist in plastic mechanisms (phenological plasticity) through individual life time or genetic mechanisms while taking change strategies on three axes: temporal, spatial and *in situ* (Bellard *et al.* 2012).

Comparing the areas of high impact, low impact and new potential distribution with mean values of bioclimatic factors according to the four RCP scenarios, it can be noticed that climatic changes between the present and RCP 2.6 can be positive for the expansion of Tell species in new areas. However, as temperature continues to rise and precipitation continues to decrease, low impact areas get larger with restriction of potential new distribution areas. This remark was also recorded by Zhang *et al.* (2018) for the distribution of *Paeonia delavayi* and *Paeonia rockii* between RCP 2.6 and RCP 8.5.

The extension of the Sahara with permanently variable parameters (Scheiter & Higgins 2009; Thomas & Nigam 2018) and a maximum temperature of the hottest period exceeding 50°C, favorable habitats of

Inuleae tribe species will be narrowed even more than by half, which makes the occurrence of these species increasingly weak and pushes threatened species like *Pulicaria filaginoides* Pomel to a more rapid extinction than expected. According to Thuiller *et al.* (2006), 47% of Namibian plant species are predicted to be vulnerable to anthropogenic climate change if they are assumed unable to migrate, knowing that these changes in addition to the distribution they will alter the phenology because plants and their physiology are not too tolerated to heat and its variation (Araújo *et al.* 2013).

The predicted habitat suitability of *Inuleae* tribe species under current and future bioclimatic variable influences could be helpful for management and conservation strategies remembering that most of these species have diverse uses in local traditional medicine and represent important fodder sources (Chehema & Youcef 2009). This study shows vulnerability of Saharan species to climate change predicted by the four RCP scenarios, which implies their valorization and the study of their adaptation modes in presence of other environmental factors.

Author Contributions

Research concept and design: D. Tahri

Acquisition and/or assembly of data: D. Tahri, F. Elhouiti, M. Yousfi

Data analysis and interpretation: D. Tahri

Drafting the article: D. Tahri, F. Elhouiti

Critical revision: F. Elhouiti, M. Ouinten

Final approval: D. Tahri, F. Elhouiti, M. Ouinte

References

- ARAÚJO M. B., FERRI-YÁÑEZ F., BOZINOVIC F., MARQUET P. A., VALLADARES F. & CHOWN S. L. 2013. Heat freezes niche evolution. *Ecol Lett* 16(9): 1206-1219. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.12155>
- ARAÚJO M. B., PEARSON R. G., THUILLER W. & ERHARD M. 2005. Validation of species – climate impact models under climate change. *Glob Chang Biol* 11(9): 1504-1513. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001000.x>
- BABALI B. & BOUAZZA M. 2016. Redécouverte de *Pulicaria vulgaris* subsp. *pomeliana* (Faure et Maire) E. Gamal-Eldin (*Asteraceae*) dans la région de Tlemcen (Algérie occidentale). *Bull Soc Linn Prov* 67: 45-52.
- BATTANDIER J. A. & TRABUT L. C. 1888. Flore de l'Algérie. Typographie Adolphe Jourdan. Alger, 1: 425-434.
- BELLARD C., BERTELSMEIER C., LEADLEY P., THUILLER W. & COURCHAMP F. 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecol Lett* 15(4): 365-377. doi: [10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x)
- BELLOUM Z., BOUHEROUM M., BENAYACHE F. & BENAYACHE S. 2013. Secondary metabolites from the aerial part of *Inula crithmoides*. *Chem Nat Comp* 49(4): 763-764. doi: <https://doi.org/10.1007/s10600-013-0735-5>
- BELYAGOUBI-BENHAMMOU N., BELYAGOUBI L. & BEKKARA F. A. 2014. Phenolic contents and antioxidant activities in vitro of some selected Algerian plants. *J Med Plant Res* 8(40): 1198-1207. doi: <https://doi.org/10.5897/JMPR2014.5554>
- BENHOUBOU S. S., DARGIE T. C. D. & GILBERT O. L. 2003. Vegetation associations in the Ougarta Mountains and dayas of the Guir hamada, Algerian Sahara. *J Arid Env* 54(4): 739-753. doi: <https://doi.org/10.1006/jare.2002.1070>
- BENISTON W. S. 1984. Fleurs de l'Algérie. Entreprise Nationale du Livre. Alger. P10.
- BENOMARI F. Z., DIB M. E. A., MUSELLI A., COSTA J. & DJABOU N. 2019. Comparative study of chemical composition of essential oils for two species of *Asteriscus* genus

- from Western Algeria. J Essent Oil Res 1-11. doi: <https://doi.org/10.1080/10412905.2019.1579761>
- CHEHMA A. 2014. Biodiversite et Phytogeographie des Ecosystemes Sahariens de la Region de Taghit (Bechar). Alg J Arid Env 4(1): 39-44. doi: <https://doi.org/10.12816/0008909>
- CHEHMA A. & YUCEF F. 2009. Variations saisonnières des caractéristiques floristiques et de la composition chimique des parcours sahariens du Sud-Est algérien. Sécheresse 20(4): 373-381.
- DESPOIS J. & RAYNAL R. 1975. Géographie de l'Afrique du Nord-Ouest. Payot. Paris. P10-41.
- ELHOUITI F., TAHRI D., TAKHI D., OUINTEN M., BARREAU C., VERDAL-BONNIN M. N., BOMBARDA I. & YOUSFI M. 2017. Variability of composition and effects of essential oils from *Rhanterium adpressum* Coss. & Durieu against mycotoxinogenic *Fusarium* strains. Arch Microbiol 199(10): 1345-1356. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00203-017-1404-z>
- ELITH J., GRAHAM C. H., ANDERSON R. P., DUDÍK M., FERRIER S., GUISAN A. & LI J. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. Ecography 29(2): 129-151. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- ELITH J., PHILLIPS S. J., HASTIE T., DUDÍK M., CHEE Y. E. & YATES C. J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. Divers Distrib 17(1): 43-57. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- FICK S. E. & HIJMANS R. J. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. Int J Climatol 37(12): 4302-4315. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- HIJMANS R. J., SCHREUDER M., DE LA CRUZ J. & GUARINO L. 1999. Using GIS to check co-ordinates of genebank accessions. Genet Resour Crop Evol 46(3): 291-296.
- KHANUM R., MUMTAZ A. S. & KUMAR S. 2013. Predicting impacts of climate change on medicinal asclepiads of Pakistan using Maxent modeling. Acta Oecol 49: 23-31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actao.2013.02.007>
- NYLINDER S. & ANDERBERG A. A. 2015. Phylogeny of the Inuleae (Asteraceae) with special emphasis on the Inuleae-Plucheinae. Taxon 64(1): 110-130. DOI: <https://doi.org/10.12705/641.22>
- OSMAN A. K. 2006. Contributions to the pollen morphology of the tribe Inuleae (subfamily Asteroideae-Compositae) in the flora of Egypt. Feddes Repertorium: Zeitschrift für botanische Taxonomie und Geobotanik 117(3-4): 193-206. DOI: <https://doi.org/10.1002/fedr.200511096>
- PHILLIPS S. J., ANDERSON R. P. & SCHAPIRE R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecol Model 190(3-4): 231-259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- PRAMANIK M., PAUDEL U., MONDAL B., CHAKRABORTI S. & DEB P. 2018. Predicting climate change impacts on the distribution of the threatened *Garcinia indica* in the Western Ghats, India. Clim Risk Manag 19: 94-105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.11.002>
- PULLIAM H. R. 2000. On the relationship between niche and distribution. Ecol Lett 3(4): 349-361. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2000.00143.x>
- RICHARDSON B. A., SHAW N. L. & PENDLETON R. L. 2012. Plant vulnerabilities and genetic adaptation. Climate change in grasslands, shrublands, and deserts of the interior American West: a review and needs assessment. General Technical Report RMRS-GTR-285. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado, USA, 48-59.
- RODRIGUES P. M. S., SILVA J. O., EISENLOHR P. V. & SCHAEFER C. E. G. R. 2015. Climate change effects on the geographic distribution of specialist tree species of the Brazilian tropical dry forests. Braz J Biol 75(3): 679-684. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.20913>
- SCHTEITER S. & HIGGINS S. I. 2009. Impacts of climate change on the vegetation of Africa: an adaptive dynamic vegetation modelling approach. Glob Chang Biol 15(9): 2224-2246. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01838.x>
- SITAYEB T. & BELABBES I. 2018. Landscape Change in the Steppe of Algeria South-West Using Remote Sensing. Annals of Valahia University of Targoviste, Geographical Series 18(1): 41-52. DOI: <https://doi.org/10.2478/avutgs-2018-0005>
- STAMBOULI-MEZIANE H. & BOUAZZA M. 2012. Anthropogenic effects on plant cover in the Tlemcen region (western Algeria). Open J Ecol 2(03): 141-146. DOI: <https://doi.org/10.4236/oje.2012.23017>
- THOMAS N. & NIGAM S. 2018. Twentieth-Century Climate Change over Africa: Seasonal Hydroclimate Trends and Sahara Desert Expansion. J Climate 31(9): 3349-3370. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0187.1>
- THUILLER W., MIDGLEY G. F., HUGHES G. O., BOMHARD B., DREW G., RUTHERFORD M. C. & WOODWARD F. I. 2006. Endemic species and ecosystem sensitivity to climate change in Namibia. Glob Chang Biol 12(5): 759-776. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01140.x>
- TORICES R. & ANDERBERG A. A. 2009. Phylogenetic analysis of sexual systems in *Inuleae* (Asteraceae). Am J Bot 96(5): 1011-1019. DOI: <https://doi.org/10.3732/ajb.0800231>
- VAN VUUREN D. P., EDMONDS J., KAINUMA M., RIAHI K., THOMSON A., HIBBARD K., HURTT G. C., KRAM T., KREY V., LAMARQUE J. F., MASUI T., MEINSHAUSEN M., NAKICENOVIC N., SMITH S. J. & ROSE S. K. 2011. The representative concentration pathways: an overview. Clim Change 109: 5-31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- YAHY N., VELA E., BENHOUEHOU S., DE BELAIR G. & GHARZOULI R. 2012. Identifying important plants areas (key biodiversity areas for plants) in northern Algeria. J. Threat. Taxa 4(8): 2753-2765. DOI: <https://doi.org/10.11609/JoTT.o2998.2753-65>
- ZHANG K., YAO L., MENG J. & TAO J. 2018. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. Sci Total Environ 634: 1326-1334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.112>