

N° d'ordre : 632

N° d'ordre
632

Sara EL GADI
Caractérisation et évaluation de la variabilité écologique, isotopique et chimique de
l'huile d'argane (*Argania spinosa* (L.) Skeels) dans les principaux bassins d'arganiers
du Centre Ouest Marocain

2022(B)

THÈSE

Présentée à la Faculté des Sciences pour obtenir le grade de :

Docteur

CED : Sciences et techniques et Sciences médicales

Spécialité : Biologie et écologie végétales, Phytochimie et Agro-alimentaire

Caractérisation et évaluation de la variabilité écologique, isotopique et chimique de l'huile d'argane (*Argania spinosa* (L.) Skeels) dans les principaux bassins d'arganiers du Centre Ouest Marocain

par :

Sara Elgadi

(Master : Gestion et Valorisation des Phytoressources)

soutenue le 30 Juin 2022

devant la commission d'examen :

Président	M. BAAZIZ	PES	FSSM, UCA, Marrakech.
Examineurs	S. GHARBY	PH	FPT, UIZ, Agadir.
	A. BOULLI	PES	FST, USMS, Béni Mellal.
	S. AISSAM	PES	FSTG, UCA, Marrakech.
	A. EL ANTARI	Dr	INRA, Marrakech.
	A. OUHAMMOU	PES	FSSM, UCA, Marrakech.
Invités	N. AMENZOU	Dr	CNESTEN, Rabat.
	A. AITLHAJ	Dr	ANDZOA, Agadir.
	K. KADIRI	Dr	ONSSA, Rabat

FICHE PRÉSENTATIVE DE LA THÈSE

Nom et Prénom de l'auteur : **ELGADI Sara**

Intitulé du Travail : Caractérisation et évaluation de la variabilité écologique, isotopique et chimique de l'huile d'argane (*Argania spinosa* (L.) Skeels) dans les principaux bassins d'arganiers du Centre Ouest Marocain

Directeur de thèse :

Nom, prénom et grade : **OUHAMMOU Ahmed**, Professeur d'Enseignement Supérieur.

Laboratoire et institution : Laboratoire des Biotechnologies Microbiennes, Agrosience et Environnement affilié à l'unité 4 de CNRST, Herbier Régional MARK, Département de Biologie, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad Marrakech.

Co-directeur :

Nom, prénom et grade : **EL ANTARI Abderraouf**, Directeur de recherche, responsable de la Section des Huiles au Centre Régional de la Recherche Agronomique de Marrakech.

Laboratoire et institution : Laboratoire de Technologie Agro-Alimentaire et Qualité, Unité de Recherche Amélioration des Plantes et de Qualité. Au Centre Régional de la Recherche Agronomique de Marrakech, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).

Laboratoires où les travaux ont été réalisés :

- Laboratoire des Biotechnologies Microbiennes, Agrosience et Environnement affilié à l'unité 4 de CNRST (BioMAgE), Herbier Régional MARK, Département de Biologie, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad Marrakech.
- Laboratoire de Technologie Agro-Alimentaire et Qualité, Unité de Recherche Amélioration des Plantes et de Qualité. Au Centre Régional de la Recherche Agronomique de Marrakech, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).
- Laboratoire d'analyses structurales et isotopiques (LASI). Centre National De L'Energie, Des Sciences Et Techniques Nucleaires, Rabat 10001, Morocco
- Laboratoire officiel d'analyses et de recherches chimiques (LOARC). Casablanca.

Période de réalisation du travail de thèse : 2018 – 2022.

Cadre de coopération-soutien financier : Bourse jeunes chercheurs sur l'arganier 2018-2019.

Ce travail a donné lieu aux résultats suivants (communications, publications,...) :

Articles dans des revues nationales et internationales à comité de lecture

Articles en relation avec la thèse

Elgadi, S., Ouhammou, A., Zine, H., Maata, N., Aitlhaj, A., El Allali, H., & El Antari, A. (2021). Discrimination of Geographical Origin of Unroasted Kernels Argan Oil (*Argania spinosa* (L.) Skeels) Using Tocopherols and Chemometrics. *Journal of Food Quality*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8884860>

Elgadi, S.; Ouhammou, A.; Taous, F.; Zine, H.; Papazoglou, E.G.; Elghali, T.; Amenouz, N.; El Allali, H.; Aitlhaj, A.; El Antari, A. Combination of Stable Isotopes and Fatty Acid Composition for Geographical Origin Discrimination of One Argan Oil Vintage. *Foods* 2021, 10, 1274. <https://doi.org/10.3390/foods10061274>

Elgadi, S., Ouhammou, A., Zine, H., Maata, N., Ait Babahmad, R., & El Antari, A. (2021). Comparative Oil Composition Study of the Endemic Moroccan Olive (*Olea europaea* subsp. *maroccana*) and Wild Olive (var. *sylvestris*) in Central West Morocco. *Journal of Food Quality*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8869060>

Autre articles

Ouswati, S.D., Hachemi, A., Moumni, A., Zine, H., **Elgadi, S.**, Belghazi, T., Ouhammou, A., El Messoussi, S. (2022). Argan (*Argania spinosa* (L.) Skeels) Seed Germination Under Some Pretreatments of Thermal Shocks. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 22(1), 56-67. <https://doi.org/10.17475/kastorman.1095893>

Teixidor-Toneu, I.; **Elgadi, S.**; Zine, H.; Manzanilla, V.; Ouhammou, A.; D'Ambrosio, U. Medicines in the Kitchen: Gender Roles Shape Ethnobotanical Knowledge in Marrakshi Households. *Foods* 2021, 10, 2332. <https://doi.org/10.3390/foods10102332>

Zine H, Ibrahimi M, Loqman S, Papazoglou EG, Ouhammad S, **Elgadi S**, Ouhdouch Y, Hakkou R, Adnani ME, Ouhammou A. Chemical Composition, Antioxidant, and Antibacterial Activities of Essential Oil of *Atriplex semibaccata* R.Br. Aerial Parts : First Assessment against Multidrug-Resistant Bacteria. *Agronomy*, 2021; 11(2) :362. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020362>

Loukhamas, S., Kerak, E., **Elgadi, S.**, Ettalibi, F., El Antari, A., & Harrak, H. (2021). Oil Content, Fatty Acid Composition, Physicochemical Properties, and Antioxidant Activity of Seed Oils of Ten Moroccan Pomegranate Cultivars. *Journal of Food Quality*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6617863>

Zine, H., Hakkou, R., **Elgadi, S.**, Diarra, A., Ait Babahmad, R., El Adnani, M., Ouhammou, A. Floristic and ecological monitoring on a store-and-release cover in arid and semi-arid environment of Kettara mine, Morocco. *Acta Ecologica Sinica*, 2021; 1–10 <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2021.01.003>.

Zine, H. ; **Elgadi, S.** ; Hakkou, R. ; Papazoglou, E.G. ; Midhat, L. ; Ouhammou, A. Wild Plants for the Phytostabilization of Phosphate Mine Waste in Semi-Arid Environments : A Field Experiment. *Minerals*, 2021; 11, 42. <https://doi.org/10.3390/min11010042>.

Zine, H., Hakkou, R., El Adnani, M., Lamnai, K., **Elgadi, S.**, Ait Babahmad, R., Midhat, L., Papazoglou, E.G., Loutfi, K., Hafidi, M., Smouni, A., Ouhammou, A. Phytostabilization of store-and-release cover made with phosphate mine wastes in arid and semiarid climate using wild local plants, *Remediation*, 2020; 1–18 <https://doi.org/10.1002/rem.21662>.

Communications dans des colloques nationaux et internationaux

Elgadi S., Ouhammou A., Zine H., Maata N., Aitlhaj A., El Allali H., El Antari A. (2022). Discrimination de l'origine géographique de l'huile cosmétique d'argan (*Argania spinosa* (L.) Skeels) à l'aide des tocophérols et de la chimiométrie. The 6th edition of the international congress of the argan tree, Agadir-Morocco. En ligne.

Elgadi S., Maata N., Amakhmakh M., El Antari A., Ouhammou A. (2019). Characterization and chemical composition of seeds oil of *Vitex agnus castus* L. 2nd edition of the International Forum on Aromatic and Medicinal Plants, Fes-Morocco.

Elgadi S., El Antari A., Taous F., Amenou N., Elghali T., Aitlhaj A., El Allali H., Ouhammou A. (2019). Influences of geographical origin on the biochemical and isotopic parameters of argan oils. The 5th edition of the international congress of the argan tree, Agadir-Morocco

Hamza Zine, **Sara Elgadi**, Rachid Hakkou, Ahmed Ouhammou. Assessment of local flora for the phytomanagement of phosphate mine wastes used as a cover to limit acid mine drainage in arid and semi-arid climate. Phosphate Days 2020, International Conference on Phosphate: Fundamentals, processes and technologies. . 15-17 Octobre 2020. Mohammed VI Polytechnic University-Bengruir-Maroc. En ligne.

Hamza Zine, Rachid Aitbahmad, **Sara Elgadi**, Meriam El Adnani, Rachid Hakkou, Ahmed Ouhammou. Floristic and ecological monitoring of local flora on a Store-and-Release cover made with phosphate mine wastes in arid and semi-arid environment of Kettara mine, Morocco. Phosphate Days 2020, International Conference on Phosphate: Fundamentals, processes and technologies. 15-17 Octobre 2020. Mohammed VI Polytechnic University-Bengruir-Maroc. En ligne.

Zine Hamza, Lamnai Kamal, **Elgadi Sara**, El Berkaoui Meryem, Hakkou Rachid, Ouhammou Ahmed. Use of native plants for the revegetation of phosphate mines wastes disposals sites in semiarid environment, Marrakech-Morocco. Phosphate Days 2018, International Conference for research on phosphates and derivatives. 12th and 13th November 2018. Mohammed VI Polytechnic University-Bengruir, Maroc.

Zine Hamza, Ait Babahmad Rachid, El Berkaoui Meryem, **Elgadi Sara**, El Adnani Mariem , Hakkou Rachid , Smouni Abdelaziz , El Faiz Abdelouahed, Bouab Nadia, Ouhammou Ahmed. Native vegetation succession on store-and-release covers made with phosphate mine waste-waste-Marrakech, Morocco. Phosphate Days 2018, International Conference for research on phosphates and derivatives. 12th and 13th November 2018. Mohammed VI Polytechnic University-Bengruir, Maroc.

Elgadi S., El Antari A., Ouhammou A. (2018). Argan (*Argania spinosa* (L) Skeels), multipurpose tree. 3rd Scientific Research Forum at the FSSM «From Scientific Research to Innovation» May 9-11 May 2018, Cadi Ayyad University, Faculty of Sciences Semlalia-Marrakech

Elgadi S., El Antari A., Ouhammou A. (2018). Evaluation of morphometric parameters and quality of oils in ecotypes of *Opuntia* Mill. In collection. 6th edition of the International School of Research Biodiversity of the PAM, Biotechnology, Terroir Products and Valorization of Natural Substances. Agadir

“Get the habit of analysis. Analysis will, in time,
enable synthesis to become your habit of mind”

— *Frank Lloyd Wright*

*Je dédie ce modeste travail
A mes chers parents,
ELGADI El Hassan et ZANFI Aicha
A mon frère, Hamza
A mes sœurs, Oumaima et Salma
A la famille ELGADI, BENRAHAL, ROUANE,
BELGUED et EL JAZOULI
A mes aimable ami (e)s, et collègues
Particulièrement, Zine Hamza, El Mahdi Redouane,
Sadki Yasser, Rhouflane Hind, Lachguer Malika,
Amakhmakh Mohamed, Grijja Hassan, Choukrane
Basma, Kharbouche Hibat Allah, Tahiri abdel-ilah et Ait
Ougougdal Houssam.
A ceux qui m'ont toujours aidés et encouragés, qui
étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné
durant mon chemin d'études.*

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier tout d'abord, **Pr. Moulay Lhassan HBID**, le Président de l'université Cadi Ayyad, **Pr. Hassan EL MODDEN** Doyen de la Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech, **Pr. Lahcen MANIAR** le Directeur du CED Sciences et techniques et Sciences médicales et **Pr. Mohamed HAFIDI** Directeur du laboratoire Biotechnologies Microbiennes Agrosiences et Environnement pour les efforts et les encouragements qu'ils n'ont cessé et ne cessent d'accorder à la recherche scientifique au sein de notre établissement.

Mes vifs remerciements à **Pr. Faouzi BEKKAOUI**, le directeur général de l'Institut Nationale de la Recherche Agronomique et **Dr. Abdelaziz BOUIZGAREN** et **Mr. Hassan SIKAOUI** le Chef et l'Ex-Chef du Centre Régional de la Recherche Agronomique de Marrakech pour l'accueil et pour les moyens logistiques accordés pour la réalisation de ce travail.

Comme l'a dit un jour *Albert Schweitzer* " *Parfois notre lumière s'éteint, puis elle est rallumée par un autre être humain. Chacun de nous doit de sincères remerciements à ceux qui ont ravivé leur flamme.*". Par cette citation, je voudrais exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon **Directeur de thèse, Pr. Ahmed OUHAMMOU** d'avoir bien voulu assurer la direction et l'encadrement de mes travaux de recherche. Merci pour vos encouragements, votre patience et vos précieux conseils. J'ai beaucoup apprécié de travailler à vos côtés tant sur le plan scientifique que sur le plan humain, à l'herbier et au terrain. Je garde toujours beaucoup de plaisir à discuter avec vous. Je vous remercie d'avoir cru en mes capacités, pour le temps et la patience que vous m'avez accordés tout au long de ces années en me fournissant d'excellentes conditions. Pour tout ce que vous m'avez donné, je vous remercie très sincèrement. Les mots ne suffisent guère pour exprimer le respect et la gratitude que je porte pour vous. Prière de trouver ici l'expression de ma plus profonde gratitude pour ces agréables années.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères au **Co-directeur de la thèse Dr. Abderraouf EL ANTARI**, mon co-directeur de thèse, de m'avoir conseillée, encouragé et soutenu tout au long de la durée de ma thèse avec patience et disponibilité, et pour la confiance qu'il m'a accordée. Je garderai dans mon cœur votre générosité, votre compréhension et votre efficacité. Pour tout ce que vous m'avez donné, je vous remercie très sincèrement. Je vous remercie également pour vos qualités humaines, vos conseils précieux, vos fructueuses

directives, vos remarques et vos critiques judicieuses. Je suis fière de proclamer avoir été un de vos doctorants.

Je suis très reconnaissant envers **les rapporteurs, Pr. Said GHARBY, Pr. Salama AISSAM et Pr. Abdelali BOULLI** qui ont accepté d'endosser la lourde charge d'examiner ce rapport avec un esprit critique dans un court délai. De même que **les membres du jury** qui ont accepté de juger la qualité scientifique et la pertinence de ce travail. Merci pour sollicitude.

Je ne saurais qu'exprimer au **Dr. Abderrahmane AITLHAJ** de l'ANDZOA, Agadir, comme il le mérite, ma reconnaissance pour ses qualités humaines. Sa collaboration et nos échanges m'ont été d'une aide précieuse pour l'aboutissement de ce travail. Sa coopération et ces directives ont apportés une qualité certaine aux différents articles publiés dans ce cadre. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude et de mon respect le plus profond.

Un grand Merci au **Dr. AMENZOU Nour Eddine** et **Mr. TAOUS Fouad** Responsables du Laboratoire LASI pour leurs disponibilité, leurs aide scientifique et administrative, leurs gentillesse et leurs conseils et discussions tout au long de mon séjour au laboratoire à Rabat. J'ai pu travailler dans un cadre particulièrement agréable, grâce à l'ensemble des membres de l'équipe de Laboratoire au CNESTEN, à LOARC et INRA particulièrement **Dr. ELGHALI Tibari, AMAKHAMAKH Mohamed** et **LACHGUAR Malika** pour votre accueil, votre disponibilité et votre aide.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à **EL ALLALI Hassan**, d'avoir m'accompagner dans les missions d'échantillonnage, pour sa disponibilité, son aide et ses conseils. Mes remerciements vont également à l'équipe de l'ANDZOA-Agadir particulièrement **IBNEZZYN Nouredine** et **GAHMOU Amesmoud** et à l'équipe GIZ Agadir.

J'adresse mes vifs remerciements à **Pr. KHABBA Said**, à **Dr. LE PAGE Michel** à **Pr. DALLAHI Youssef** et à **Pr. NAHID Abderrazzak** qui m'ont beaucoup aidé dans la partie géologie et cartographie. Je remercie également **Dr. HARRAK Hasnaa** pour ses conseils pertinents.

Un grand merci à l'ANDZOA, la **GIZ**, l'**AgroTech** et **LAFARGE** pour leur soutien technique, financier et logistique consacré à la réalisation de ce travail.

Viennent ensuite ceux que j'ai côtoyés au quotidien doctorant(e)s et stagiaires au Laboratoire, à l'**herbier**, au **département de Biologie-FSSM**, à l'**INRA** de Marrakech, au **CNESTEN** et à **LOARC**. Il serait difficile de vous citer et de mentionner tous ce que nous avons partagés. Donc, je vous dis juste MERCI.

Je tiens à adresser mes remerciements à mes amis **Dr. ZINE Hamza et ELMAHDI Redouane**, pour vos soutiens moraux, vos encouragements et vos conseils, sans oublier toutes et tous mes ami(e)s du Master gestion et valorisation des phytoressources, je pense particulièrement à **OUHADDOU Soukaina, HRIOUCH Fatima Ezzahra et SISSI Saida** et les membres de l'association **MBLA**.

Enfin, merci à ceux qui me soutiennent depuis toujours. Mon père **El Hassan ELGADI**, ma mère **Aicha ZANFI**, mon frère **Hamza**, mes deux sœurs **Oumaima et Salma**. Merci d'avoir su si discrètement louvoyer entre les moments de déception, de joie, de colère, d'enthousiasme, de dépit, de stress que je vous ai imposée depuis bien trop longtemps. A cette occasion, vous avez hérité incontestablement le rôle le plus difficile mais que vous avez rempli avec brio.

Un vif hommage aux femmes de la **Coopérative Tighanimine Filahia** du village Tighanimine Agadir, Merci pour votre accueil chaleureux.

Merci pour tout. A tous ceux que je ne cite pas ici et qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail... qu'ils y trouvent l'expression de ma profonde gratitude.

Résumé

La zone du centre-Ouest Marocain est considérée comme un hotspot régional en raison de ses caractéristiques abiotiques et biotiques mettant en évidence ses originalités. Ces dernières résultant de l'impact des conditions géographiques, climatiques et bioclimatique particulières reflétant ainsi la diversité de flore et la végétation révélée par la richesse, la diversité, le taux de l'endémisme et les espèces rares et menacées. Dans ce biotope, l'arganier constitue l'élément le plus remarquable par ses services écosystémique.

Face à la forte demande d'huile d'argane, la protection de l'origine géographique et le contrôle de la qualité sont des priorités principales pour les autorités agricoles marocaines. Le contrôle de la qualité et la traçabilité de l'huile d'argane nécessite une caractérisation chimique précise et exhaustive tenant en compte les variabilités environnementales au niveau des terroirs de l'arganier. La présente étude s'est intéressée à trois paramètres prouvés par plusieurs études scientifiques ayant un lien avec l'origine géographique à savoir : le profil des acides gras, un paramètre essentiel qui certifie la pureté de l'huile d'argane. La concentration des tocophérols qui est considérée comme un outil prometteur pour la prédiction de l'origine géographique. En outre, les isotopes stables se sont récemment révélés être un indicateur précis de l'origine géographique. Dans cette étude, la composition des acides gras a été étudiée par chromatographie en phase gazeuse (CPG-FID), la concentration des tocophérols par chromatographie en phase liquide à haute performance (CLHP) et le rapport d'isotopes stables par spectrométrie de masse à rapport isotopique (SMRI) six origines géographiques des arganeraies localisées à Safi, Essaouira, Agadir Ida Outanane, Taroudant, Tiznit et Sidi Ifni, ont été l'objet de collecte de nos échantillons qui ont été extraites dans les mêmes conditions. Les résultats obtenus ont montré que l'isotope $\delta^{13}\text{C}$, l'acide palmitique (C16:0), l'acide linoléique (C18:2), l' α -tocophérol, le γ -tocophérol et le δ -tocophérol sont fortement influencés par les paramètres géographiques notamment la distance de la mer, la latitude et l'altitude. Une analyse discriminante linéaire (ADL) est réalisée pour différencier les provenances étudiées. Les modèles discriminants ont prédit l'origine de l'huile d'argane avec un taux de réussite de 92,70% par la combinaison du profil des acides gras et du profil isotopique. Cependant, la capacité de prédiction des modèles ADL basés uniquement sur les homologues des tocophérols était de 87,2%. Ces résultats fournissent la base pour approcher les origines géographiques de la production d'huile d'argane avec des caractéristiques bien définies afin de valoriser l'huile d'argane et améliorer les revenus des populations locales. En outre, cette étude fournit une base très prometteuse pour la localisation des variétés d'argane à teneur élevée en tocophérol, ainsi

que pour contribuer à la traçabilité et à la protection de l'indication géographique de l'huile d'argane. Par ailleurs, ils peuvent potentiellement être utilisés comme des marqueurs spécifiques pour les huiles marquées d'une Indication Géographique Protégée (IGP).

Dans le but de valoriser certaines espèces oléagineuse de l'arganeraie, nous étions intéressés à la composition chimique de l'huile de deux sous espèces d'oliviers : sous-espèce méditerranéenne *Olea europaea* var. *sylvestris* (Oléastre) et de la sous-espèce micro-endémique *maroccana* cooccurrence dans la région de Ida Outanane. Les résultats suggèrent que l'huile de *maroccana* pourrait être considérée comme une source potentielle de vitamine E, d'acides gras et de stérols et fournir ainsi une huile nutraceutique au profit de la population locale. Bien que ce travail ait contribué à l'étude de la biodiversité des oliviers, des investigations supplémentaires sont encore nécessaires pour mieux valoriser la sous-espèce *maroccana*.

Les résultats obtenus ont été cartographiés et rassemblés dans une carte thématique interactive afin de rendre l'accès rapide et facile aux informations sur les origines géographiques de l'huile d'argane. La base de données développée à partir de cette étude sera utilisée pour approcher le potentiel réel de l'activité anti-oxydante et de la composition chimique de l'huile d'argane. En outre, elle peut être utile pour justifier l'actualisation de la norme marocaine N.M.08.5.090 de cette huile.

Mots-clés: *Argania spinosa* ; paramètres écologiques ; marqueur chimique ; marqueur biologique ; techniques isotopiques ; prédiction de l'origine géographique ; chimiométrie ; *Olea europaea* subsp. *maroccana* ; SIG.

Abstract

The central West Moroccan area is considered as an important regional hotspot due to its abiotic and biotic characteristics highlighting its originality. This concept includes the geographical and climatic conditions in one hand, and the plant diversity revealed by the richness, the diversity of the flora and the high number of endemic, rare and threatened plant species in the other hand. The argan tree and the argane forest constitute the most valuable elements by their ecosystem services and products.

Under the high demand of Argane oil, the protection of geographical origin and quality control have been priorities for the Moroccan agricultural authority. Quality control and traceability of Argane oil requires precise chemical characterization considering different provenances. The fatty acid profile is an essential parameter that certifies the purity of Argane oil. The concentration of tocopherol is regarded as a promising tool for geographical origin prediction. In addition, stable isotopes were recently shown to be accurate as an indicator for geographical origin. In this study, the composition of fatty acid was investigated by gas chromatography (GC-FID), the amount of tocopherols by high performance liquid chromatography (HPLC-FLUO) and stable isotope ratio by isotope ratio mass spectrometry (IRMS) for classifying Argane oil according to its geographical origin. Argane fruit samples, belonging to six geographical origins of Moroccan natural Argane population (Safi, Essaouira, Agadir Ida Outanane, Taroudant, Tiznit and Sidi Ifni) were collected and extracted under the same conditions. The results show that the isotope $\delta^{13}\text{C}$, palmitic acid (C16:0), linoleic acid (C18:2), α -tocopherol, γ -tocopherol and δ -tocopherol were strongly influenced by ecological parameters especially the distance from the coast, latitude and altitude. Linear discriminant analysis (LDA) was performed to discriminate the six studied provenances. Discriminant models predicted the origin of Argane oil with 92.70% success by the combinaison of fatty acid and isotopic profil. However, the prediction ability of the LDA models based only on tocopherols homologues was 87.2%. These results provide the basis for determining the geographical origins of Argane oil production with well-defined characteristics to increase the product's value and the income of local populations. In addition, this study provides a very promising basis for developing Argane varieties with a high content of tocopherol homologues, as well as contributing to the traceability and protection of Argane oil's geographical indication. Moreover, they can potentially be used as specific markers for oils labeled with Protected Geographical Indication (PGI).

In order to valorize some oilseed species of the argane forest. The oil chemical composition of the widespread Mediterranean subspecies *europaea* var. *sylvestris* (oleaster) and the micro-endemic subspecies *maroccana* co-occurring the argane area was investigated. The findings suggest that *maroccana* oil could be considered as a potential source of vitamin E, essential fatty acids and sterols and can provide a nutraceutical oil for the local population. While this work contributes to the study of olive tree biodiversity, further investigations are still necessary to guide the putative nutraceutical use of subspecies *maroccana*.

The results obtained were mapped and collected into an interactive map in order to make access to information quick and easy. The database developed from this study will be used to show the real potential of anti-oxydant activity and chemical composition. Furthermore, it can be useful for updating the Moroccan standard N.M.08.5.090 of Argane oil.

Keywords: *Argania spinosa* ; ecological parameters ; chemical fingerprint ; biological fingerprint ; isotope techniques; geographical origin prediction; chimometrics; *Olea europaea* subsp. *maroccana*; SIG.

ملخص

تعتبر منطقة الغرب الأوسط المغربي بؤرة تنوع حيوي إقليمي بسبب خصائصها الإحيائية والا إحيائية المتفرّدة. يعكس مفهوم المنطقة الإقليمية الحيوية الظروف الجغرافية والمناخية والبيومناخية التي تؤثر على التنوع والغطاء النباتيين وكذا معدل التوطن والأنواع النادرة المهددة بالانقراض. وتعد شجرة الأركان والتشكل النباتي المرافق لها من أكثر العناصر بروزاً في إنتاج خدمات النظام البيئي.

في ظل الطلب المتزايد على زيت الأركان، تعتبر حماية الأصل الجغرافي ومراقبة الجودة من أهم أولويات السلطات الفلاحية وعليه فإن مراقبة الجودة تستلزم توصيفاً كيميائياً دقيقاً مع مراعاة الأصول الجغرافية المختلفة. يعتبر نمط الأحماض الدهنية مؤشر أساسي في المصادقة على جودة ونقاء زيت الأركان. بالإضافة إلى ذلك، يعتبر تركيز توكوفيرول أداة واعدة للتنبؤ بالمنشأ الجغرافي، ولقد ثبت مؤخراً أن النظائر المستقرة كذلك مؤشراً دقيقاً للأصل الجغرافي. وفي هذا الصدد، ومن خلال هذه الدراسة، تم فحص تكوين الأحماض الدهنية بواسطة كروماتوغراف الغاز المسال (CG-FID)، وتركيز توكوفيرول بواسطة كروماتوغراف السائل عالي الأداء (HPLC) ونسبة النظائر المستقرة عن طريق مقياس الطيف الكتلي لنسبة النظائر (IRMS) لتصنيف زيت الأركان وفقاً لأصلها الجغرافي باستعمال عينات ثمار الأركان المنتمية إلى ستة أصول جغرافية طبيعية الواقعة في آسفي، الصويرة، أكادير إداوتنان، تارودانت، تزنييت وسيدي إفني.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن نظير $\delta^{13}C$ ، حمض البالمتيك (C16:0)، حمض اللينوليك (C18:2)، ألفا توكوفيرول، جاما توكوفيرول ودلتا توكوفيرول يتأثرون بشدة بالمعايير الجغرافية بما في ذلك البعد عن البحر وخطوط العرض وكذا مستوى الارتفاع. من أجل إثبات فعالية هذه المركبات تم إجراء تحليل التمايز الخطي (LDA). ولقد تنبأت النماذج التمييزية بأصل زيت الأركان بمعدل نجاح 92.70% من خلال الجمع بين نمط الأحماض الدهنية والنظائر الكيميائية. ومع ذلك فإن القدرة التنبؤية لنماذج ADL القائمة فقط على تماثلات توكوفيرول كانت 87.2%. تُشكّل هذه النتائج الأساس لمقاربة الأصول الجغرافية لإنتاج زيت الأركان بخصائص محددة بشكل دقيق من أجل تثمينه وبالتالي تحسين دخل الساكنة المحلية.

بالإضافة إلى ذلك، توفر هذه الدراسة أساساً واعدًا لتطوير أصناف الأركان ذات محتوى مرتفع من توكوفيرول، وكذلك للمساهمة في تتبع وحماية المؤشر الجغرافي لزيت الأركان. علاوة على ذلك، يمكن استخدامها كعلامات محددة للزيوت المميزة بمؤشر جغرافي محمي (IGP).

ومن أجل تثمين الثمار الزيتية لبعض الأنواع النباتية المصاحبة لشجرة الأركان تمت مقارنة التركيب الكيميائي لزيت نوعين فرعيين من أشجار الزيتون: نوع فرعي متوسطي *Olea europaea* var. *syvestris* (البري) والأنواع الفرعية المستوطنة الدقيقة *maroccana* في منطقة إداوتنان. وتشير النتائج إلى أن زيت *maroccana* يمكن اعتباره مصدرًا محتملاً لفيتامين هاء، الأحماض الدهنية والستيرولات وبالتالي يوفر زيتاً مغذياً. على الرغم من أن هذا العمل قد ساهم في دراسة التنوع البيولوجي لأشجار الزيتون، إلا أنه لا يزال من الضروري إجراء دراسات إضافية لتحسين قيمة سلالات *maroccana* الفرعية.

وفي الأخير تم جمع النتائج التي تم الحصول عليها في خريطة موضوعية تفاعلية من أجل الوصول السريع والسهل إلى المعلومات المدروسة حول الأصول الجغرافية لزيت الأركان. وسيتم استخدام قاعدة البيانات التي تم تطويرها في هذه الدراسة لمقاربة الإمكانات الحقيقية للنشاط المضاد للأكسدة والتركيب الكيميائي لزيت الأركان. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يكون مفيداً لتحديث المعيار المغربي NM.08.5.090 لهذا المنتج.

الكلمات المفتاح: *Argania spinosa*؛ المعلومات البيئية؛ مؤشر كيميائي؛ مؤشر بيولوجي؛ التقنيات النظرية؛ التنبؤ بالمنشأ الجغرافي؛ القياسات الكيميائية؛ *Olea europaea* subsp. *maroccana*؛ نظم المعلومات الجغرافية.

TABLE DES MATIERES

Résumé	x
Abstract	10
ملخص	12
Introduction générale.....	1
Chapitre 1	11
Présentation générale de la zone du centre Ouest du Maroc	11
I. Caractéristiques physiographiques-----	15
I.1 Situation générale	15
I.2 Aspects géologique, géomorphologique et hydrologique	15
I.2.1 Aspect géologique	15
I.2.2 Aspects géomorphologiques	18
I.2.3 Aspect hydrologique	19
I.3 Aspects climatique et bioclimatique	20
I.3.1 Facteurs hydriques	20
I.3.1.1 Précipitations	20
I.3.1.2 Humidité relative	21
I.3.2 Facteurs thermiques	24
I.3.2.1 Températures minimales	24
I.3.2.2 Températures maximales	24
I.4 Synthèse bioclimatique	26
I.4.1 Amplitude thermique	26
I.4.2 Quotient pluviothermique et bioclimats	27
I.4.3 Diagrammes ombrothermiques	30
II. Aspects phytogéographiques : Analyse de la flore et de la végétation -----	31
II.1 Zones d'échantillonnage.....	31
II.2 Exécution des relevés	32
II.3 Analyse des variables	33
II.3.1 Variables topoclimatiques	33
II.3.2 Données floristiques	33
II.4 Analyses des données	34
II.4.1 Analyse floristique	35
II.4.1.1 Individualisation des espèces caractéristiques des groupements végétaux	37
II.4.2 Analyse phyto-écologique.....	40
II.4.2.1 Tableau des valeurs propres	41
II.4.2.2 Interprétation des axes factoriels	43
II.5 Déterminisme écologique des groupements végétaux	44
III. Conclusions -----	47
Chapitre 2	52
Discrimination of geographical origin of unroasted kernels Argan oil (<i>Argania spinosa</i> (L.) Skeels) using tocopherols and chemometrics.....	52
I. Introduction -----	55
II. Materials and Methods -----	57
II.1 Plant material.....	57
II.2 Oils extraction.	58
II.3 Physicochemical Quality Parameters.	58
II.4 Tocopherols composition.	59
II.5 Statistical analysis.	59
III. Results and Discussion -----	60
III.1 Physicochemical Quality Parameters.	60

III.2	Tocopherols composition.	60
III.3	Relation between geographical parameters and tocopherols.	63
III.4	Principal compound analysis (PCA).....	64
III.5	Linear Discriminant Analysis (LDA)	65
IV.	Conclusion	67
Chapitre 3		71
Combination of Stable Isotopes and Fatty Acid Composition for Geographical Origin		
Discrimination of One Argan Oil Vintage..... 71		
I.	Introduction	74
II.	Materials and Methods	75
II.1	Sampling Area and Plant Material.....	75
II.2	Oil Extraction	76
II.3	Chemical Composition	77
II.3.1	Fatty Acids	77
II.3.2	Stable Isotope Analysis	77
II.4	Statistical Analysis	77
III.	Results and Discussion	78
III.1	Geographical Parameters	78
III.2	Chemical Composition	80
III.2.1	Fatty Acids.....	80
III.2.2	Isotopic Composition	82
III.2.3	Relation between Ecological Parameters and Argan Oil Composition.....	83
III.2.4	Linear Discriminant Analysis (LDA)	84
IV.	Conclusions	86
Chapitre 4		91
Comparative oil composition study of the endemic Moroccan olive (<i>Olea europaea</i> subsp. <i>maroccana</i>) and wild olive (var. <i>sylvestris</i>) in Central West Morocco		
I.	Introduction	94
II.	Materials and Methods	96
III.	Results and Discussion	98
IV.	Conclusions	106
Chapitre 5		111
Système d'information géographique des arganeraies du Centre Ouest Marocain .. 111		
Chapitre 6		119
Contribution à la mise à jour de la norme NM.08.5.090		
I.	Introduction	120
II.	Paramètres de qualité	121
III.	Acides gras	123
IV.	Tocophérols	123
V.	Conclusions	128
Discussions générales		130
I.	Relation entre la composition floristique et les modalités des variables des arganeraies centro-occidentales	131
II.	Relation entre les modalités des variables et la composition chimique ---	134
III.	Relation entre la composition floristique et la composition chimique ----	136

<i>Conclusions générales et perspectives</i>	<i>140</i>
<i>Annexes.....</i>	<i>144</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Chapitre 1</i>	11
<i>Présentation générale de la zone du centre Ouest du Maroc</i>	11
Tableau 1. Données générales sur les provinces – région à arganiers étudiées.....	36
<i>Chapitre 2</i>	52
<i>Discrimination of geographical origin of unroasted kernels Argan oil (Argania spinosa (L.) Skeels) using tocopherols and chemometrics</i>	52
Table 1. Geographical parameters of the six sampled provenances of Argan trees.	58
Table 2. Mean values and standard deviations of the oil content and quality parameters of argan oil from six provenances.....	60
Table 3. Discriminant functions elaborated based on the tocopherols composition.	66
Table 4. Performance of the LDA classification models for the geographical origin prediction.	66
<i>Chapitre 3</i>	71
<i>Combination of Stable Isotopes and Fatty Acid Composition for Geographical Origin Discrimination of One Argan Oil Vintage</i>	71
Table 1. Fatty acid composition of Argan oils from different geographical origins.	81
Table 2. Correlation of stable isotope ratios and fatty acid contents of Argan oil from six provenances with geographical parameters.....	83
Table 3. Discriminant functions elaborated based on the combination of stable isotope ratios and fatty acid composition.	85
Table 4. Performance of the LDA model for prediction of origin of Argan oil from the six provinces.	86
<i>Chapitre 4</i>	91
<i>Comparative oil composition study of the endemic Moroccan olive (Olea europaea subsp. maroccana) and wild olive (var. sylvestris) in Central West Morocco</i>	91
Table 1. Oil content and quality indices of subsp. <i>maroccana</i> (OEM) and <i>O. e.</i> subsp. <i>europaea</i> var. <i>sylvestris</i> (OES) oils compared to EVOO for two successive years, 2017 and 2018.....	99
Table 2. Fatty acid composition (%) of subsp. <i>maroccana</i> (OEM) and <i>O. e.</i> subsp. <i>europaea</i> var. <i>sylvestris</i> (OES) for two successive years, 2017 and 2018.	100
Table 3. Tocopherol composition (mg/kg) of <i>Olea europaea</i> subsp. <i>maroccana</i> (OEM) and <i>O. e.</i> subsp. <i>europaea</i> var. <i>sylvestris</i> (OES) during 2017 and 2018.....	102
Table 4. Phytosterols content in mg/100g and the phytosterol composition (%) of <i>Olea europaea</i> subsp. <i>maroccana</i> (OEM) and <i>O. e.</i> subsp. <i>europaea</i> var. <i>sylvestris</i> (OES).....	104
<i>Chapitre 5</i>	111
<i>Système d'information géographique des arganeraies du Centre Ouest Marocain</i>	111
<i>Chapitre 6</i>	119
<i>Contribution à la mise à jour de la norme NM.08.5.090</i>	119
Tableau 1 : les paramètres de qualité des huiles d'argane torréfiées.....	121
Tableau 2 : les paramètres de qualité des huiles d'argane non-torréfiées	122
Tableau 3 : Composition en acides gras des huiles d'argane torréfiées	124
Tableau 4 : Composition en acides gras des huiles d'argane non-torréfiées.....	125
Tableau 5 : la composition en tocophérols des huiles d'argane torréfiées et non-torréfiées	126
<i>Discussions générales</i>	130
Annexe 1. Présentation et localisation des points relevés des arganeraies dans les provinces et régions du Maroc centro-occidental (Tableau complémentaire de la figure 10).....	144
Annexe 2. Liste des taxons inventoriés dans les points relevés des provinces - régions étudiées ...	145
Annexe 3. Les marqueurs spécifiques des provinces-régions étudiées	149

LISTE DES FIGURES

Figure A. Organigramme de la thèse.....	7
<i>Chapitre 1</i>	11
<i>Présentation générale de la zone du centre Ouest du Maroc</i>	11
Figure 1. Présentation géographique du Centre-Ouest du Maroc	16
Figure 2. Carte géologique du Centre Ouest Marocain (élaborée par l’auteure sur la base de la carte de Saadi et <i>al.</i> , (1982).....	17
Figure 3. Carte de la diversité géomorphologique de la zone du Centre-Ouest du Maroc assemblé par l’auteure.....	18
Figure 4. Réseau hydrique du Centre-Ouest marocain assemblé par l’auteure.	19
Figure 5. Répartition spatiale des tranches de précipitations (A en mm) et des taux d’humidité relative (B en %) hivernale (B1) et estivale (B2) des points relevés échantillonnés, assemblée par l’auteure.....	23
Figure 6. Cartes des isothermes des températures minimales (A) et des températures maximales (B) en °C, assemblées par l’auteure.....	25
Figure 7. Amplitude thermique et types de climat des points relevés dans l’aire de l’arganier	27
Figure 8. Climagramme des principaux points relevés dans l’aire de l’arganier répartis selon leur provinces et région.	28
Figure 9. Diagrammes ombrothermiques des principales localités des points relevés du Nord au Sud dans la zone d’étude.	30
Figure 10. Carte de la localisation des 83 relevés échantillonnés dans les zones arganiques du Centre-Ouest marocain.....	32
Figure 11. Classification hiérarchique combinée à la carte thermique des distances euclidiennes à partir des fréquences de la composition floristique de chaque province et région (G1 : Safi, G2 : Essaouira, G3 : Agadir, G4 : Agadir Ida-Outanane, G5 : Taroudant, G6 : Tiznit et G7 : Sidi Ifni). .	37
Figure 12. Ordination des provinces - région et des groupements végétaux des arganeraies en fonction des modalités physiques, climatiques et bioclimatiques. Plan factoriel 1-2 de l’Analyse Factorielle des Composantes.	42
<i>Chapitre 2</i>	52
<i>Discrimination of geographical origin of unroasted kernels Argan oil (Argania spinosa (L.) Skeels) using tocopherols and chemometrics</i>	52
Figure 1. Altitude of sampling provenances and localisation of argan samples	57
Figure 2. Boxplot of (a) α -tocopherol (b) γ -tocopherol (c) δ -tocopherol and (d) total tocopherol in Argan oil samples collected in different provinces (Safi (SA), Essaouira (ES), Agadir (AG), Taroudant (TA), Tiznit (TI), and Sidi Ifni (SI). Significant differences ($p < 0.05$) were expressed by different letters	62
Figure 3. Heatmap of Pearson’s correlation coefficient between tocopherol homologues and geographical parameters.....	63
Figure 4. Principal Component Analysis (PCA) on the tocopherols amount of 39 samples from six different provenances (SA: Safi, ES: Essaouira, AG: Agadir, SI: Sidi Ifni, TA: Taroudant, TI: Tiznit)	64
Figure 5. Linear discriminant analysis based on the tocopherols amount of 39 samples from six different provenances	65
<i>Chapitre 3</i>	71
<i>Combination of Stable Isotopes and Fatty Acid Composition for Geographical Origin Discrimination of One Argan Oil Vintage</i>	71
Figure 1. Sampling areas and localization of studied Argan samples.	76
Figure 2. Hierarchical clustering and heatmap of geographical parameters of each sampled location. The rows in the heatmap represent the sampled locations, Safi (Sa), Essaouira (Es), Agadir Ida Outanane (Ai), Taroudant (Ta), Tiznit (Ti) and Sidi Ifni (Si) and the columns indicate geographical	

parameters, altitude, longitude, distance from the coast (Dist-coast), maximal temperature (T.Max), minimal temperature (T.Min), humidity, latitude and rain. Red and orange cells indicate a higher value for the corresponding geographical parameter and blue cells indicate low values.....	79
Figure 3. Gas chromatogram (GC-FID) of fatty acid methyl esters of an Argan oil sample.....	80
Figure 4. Boxplot of (a) $\delta^{13}\text{C}$ and (b) $\delta^{15}\text{N}$ in Argan oil samples collected in different provinces (Safi (SA), Agadir Ida Outanane (Ai), Essaouira (ES), Sidi Ifni (SI), Taroudant (TA) and Tiznit (TI). Significant differences ($p < 0.05$) were expressed by different letters.....	82
Figure 5. Linear discriminant analysis performed based on a combination of isotopic and fatty acid composition of Argan oil samples from six provinces.....	84
Chapitre 4.....	91
Comparative oil composition study of the endemic Moroccan olive (<i>Olea europaea</i> subsp. <i>maroccana</i>) and wild olive (var. <i>sylvestris</i>) in Central West Morocco.....	91
Figure 1. Branch of A) subsp. <i>maroccana</i> (OEM) and B) <i>O. e.</i> subsp. <i>europaea</i> var. <i>sylvestris</i> (OES).....	96
Figure 2. A) Scores and B) loading plots with Principal Component Analysis (PCA) for subsp. <i>maroccana</i> (OEM) and <i>O. e.</i> subsp. <i>europaea</i> var. <i>sylvestris</i> (OES) for two successive years, 2017 (17) and 2018 (18) according to their fatty acid composition.....	101
Figure 3. A) Scores and B) loading plots with Principal Component Analysis (PCA) for subsp. <i>maroccana</i> (OEM) and <i>O. e.</i> subsp. <i>europaea</i> var. <i>sylvestris</i> (OES) for two successive years, 2017 (17) and 2018 (18) according to their tocopherol composition.....	103
Figure 4. A) Scores and B) loading plots with Principal Component Analysis (PCA) for subsp. <i>maroccana</i> (OEM) and <i>O. e.</i> subsp. <i>europaea</i> var. <i>sylvestris</i> (OES) for two successive years, 2017 (17) and 2018 (18) according to their phytosterol composition.....	105
Figure 5. A) Scores and B) loading plots with Principal Component Analysis (PCA) for subsp. <i>maroccana</i> (OEM) and <i>O. e.</i> subsp. <i>europaea</i> var. <i>sylvestris</i> (OES) for two successive years, 2017 (17) and 2018 (18) according to the combination of fatty acid, tocopherol and phytosterol composition.....	106
Chapitre 5.....	111
Système d'information géographique des arganeraies du Centre Ouest Marocain	111
Figure 1. Etapes d'élaboration de la carte interactive	113
Figure 2. Carte interactive des arganeraies du centre ouest Marocain	114
Figure 3. Étiquette des paramètres écologiques des arganiers	115
Figure 4. Étiquette de la composition chimique et isotopique des huiles de l'arganier	116
Figure 5. Étiquette de la formation géologique	116
Figure 6. Étiquette de l'air de répartition des arganeraies.....	117
Chapitre 6.....	119
Contribution à la mise à jour de la norme NM.08.5.090	119
Discussions générales	130
Figure 1. Ordination des provinces - région et des groupements végétaux des arganeraies en fonction des modalités physiques, climatiques et bioclimatiques.	133
Figure 2. Corrélations de Pearson et classification hiérarchique des modalités des variables géographique, climatique et bioclimatique, les compositions chimique et isotopique.....	134
Figure 3. Ordination en AFC de la composition floristique de chaque province en fonction de la composition chimique et isotopique.....	138

LISTE DES ABBREVIATIONS

APG IV	Angiosperm Phylogeny Group IV
CHA	Classification hiérarchique ascendante
CPG-FID (CG)	Chromatographie en phase gazeuse à détection par ionisation de flamme
DMN	Direction de la Météorologie Nationale
HCEFLCD	Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification marocaine
HPLC (CLHP)	Chromatographie en phase liquide à haute performance
IGP (PGI)	Indication géographique protégée
IMANOR	Institut Marocain de Normalisation
IRMS (SMRI)	Isotope Ratio Mass Spectrometry
J.C	Jésus-Christ
LDA (ADL)	Linear discriminant analysis
MAPM	Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts
MOROCCO FOODEX	Etablissement autonome de contrôle et de coordination des exportations
MUFA	Mono Unsaturated Fatty Acid
OEM	<i>Olea europaea</i> subsp. <i>maroccana</i>
OEO	<i>Olea europaea</i> subsp. <i>europaea</i> var. <i>sylvestris</i>
ONU	Organisation des Nations unies
PCA (ACP)	Principal Component Analysis
PMV	Plan Maroc Vert
PUFA	PolyUnsaturated Fatty Acid
SIG	Système d'information géographique
UFA	Unsaturated Fatty Acid
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, les plantes, connaissent un regain d'intérêt très particulier auprès de la communauté scientifique tout comme le grand public en mettant en œuvre des extraits et des principes actifs d'origine végétale (Abreu *et al.*, 2013). L'étude de la biodiversité de la flore et de la végétation vise la connaissance botanique et écologique de ce patrimoine pour leur valorisation et conservation durables suite à leurs intérêts environnementaux et socioéconomiques.

Le Maroc, vu sa position géographique, ses potentialités géomorphologiques et ses particularités climatiques, représente un carrefour biogéographique original (Benabid et Fennane, 1994). Cette originalité est plus remarquable au sein de la zone du centre ouest marocain dans laquelle l'arganier (*Argania spinosa* (L.) Skeels) et la formation végétale induite, l'Arganeraie y constituent la clé de voute (Peltier, 1982 ; Benabid, 2000). L'arganeraie est un écosystème endémique en particulier au Maroc, où se trouvent les plus importants peuplements (Msanda *et al.*, 2005 ; De Waroux et Lambin, 2012). Dans le centre-Ouest du Maroc, selon le Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification marocaine, l'arganeraie couvre une superficie de plus 830 000 ha. Elle s'étend de Safi au Nord jusqu'aux portes du Sahara marocain (Oued Noun) au Sud, en passant par les vallées fertiles du Souss, l'Anti-Atlas, et les zones côtières de Sidi Ifni (Peltier, 1982 ; Msanda *et al.*, 2005).

L'arganier est un arbre épineux de taille pouvant atteindre 8 à 10 m de hauteur à cime étalée (Benabid et Fennane, 1994). Le tronc est très vigoureux et court, avec une écorce rugueuse craquelée en 'peau de serpent' (Emberger, 1938). L'arganier fleurit entre les mois de mai et juin et les fruits apparaissent à l'âge de 5 ans vers la fin du mois de juillet ou le début du mois d'août (Ferradous, 2018). Il est considéré comme une espèce semi-caducifoliée, ligneuse thermo-xérophile par sa résistance à la chaleur et à l'aridité (Emberger, 1939 ; Peltier, 1982). Il peut endurer des températures allant parfois jusqu'à 50°C. Et grâce à son puissant système racinaire, il préserve le sol, le rend fertile et le protège contre les différents phénomènes d'érosion qui mènent à la désertification des zones limitrophe au nord du Sahara marocain (Mokhtari, 2014). Il est la seule représentante au Maroc de la famille d'origine tropicale des Sapotacées, faisant partie de l'ordre des Ebénales ou Ericales (Fennane & Ibn Tattou, 1998 ; APG IV, 2016). L'arganier est aussi connu par sa grande diversité phénotypique.

Depuis l'aube des temps, l'arganier est profondément ancré dans la vie quotidienne des populations rurales du centre-ouest du Maroc et joue un rôle important dans leur subsistance. Le bois de l'arganier est excellent pour la fabrication du charbon et dans l'artisanat, son feuillage

est une denrée de base pour le bétail (surtout les caprins et les dromadaires) pendant une bonne période de l'année (Charrouf, 1995). Cependant, son principal attrait est son fruit, qui donne une huile précieuse à multiples usages. Cette dernière est extraite des amandons (2 à 3) de la graine de l'arganier après le séchage, le dépulpage, le concassage, la torréfaction et la mouture. L'extraction de l'huile peut se faire selon deux procédés, (i) traditionnel fastidieux effectué par les femmes Amazigh locales, dont le rendement huileux ne dépasse pas 3% du poids total du fruit, ou (ii) industriel par presse mécanique (Charrouf & Guillaume, 2008). Ce dernier processus permet d'améliorer les conditions de travail ainsi que le rendement de l'extraction (El Monfalouti *et al.*, 2010). L'extraction par presse mécanique, exclusifs à l'industrie cosmétique, a aussi connu un essor important durant la dernière décennie (Guillaume & Charrouf., 2011). L'huile extraite (torréfiée ou non-torréfiée) est connue par sa haute valeur commerciale. Elle est, non seulement la principale, mais parfois la seule source de revenu pour de nombreux ménages ruraux (M'hirit *et al.*, 1998). D'où, son rôle crucial dans la promotion des emplois au niveau local et la lutte contre la pauvreté (coopératives féminines), qui rejoignent l'Agenda 2030 des Nations Unies (ONU) pour le développement durable (ONU, 2018). Ainsi, après la déclaration de la région de l'arganier comme réserve de biosphère par l'Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture en 1998 (UNESCO, 1998), l'ONU a proclamé le 10 mai comme journée internationale pour célébrer cette espèce emblématique (Résolution de l'Assemblée générale de l'ONU, N° A/RES/75/262, 2021).

Actuellement, de nombreuses recherches ont déterminé la composition chimique de l'huile d'argane en mettant en évidence sa richesse, essentiellement, en composés antioxydants, en acides gras, en tocophérols ainsi qu'en stérols (Charrouf et Guillaume, 2008 ; Harhar *et al.*, 2011 ; Gharby *et al.*, 2011, 2012). Grâce à sa composition nutritionnelle et cosmétique riche, l'huile d'argane est très utilisée dans la pharmacopée locale et internationale, ainsi que dans l'art culinaire grâce à ses qualités organoleptiques (Adlouni, 2010 ; Teixidor-Toneu *et al.*, 2021). Elle a été indiquée pour le traitement des rhumatismes, l'hypercholestérolémie et l'athérosclérose (Charrouf, 2002 ; Cherki *et al.*, 2005). En outre, Il possède des vertus cosmétiques pour soigner les brûlures, le lentigo, les ongles et les cheveux. Elle permet de ralentir le vieillissement de la peau et renforce son hydratation.

Plan Maroc Vert (PMV), a permis la réhabilitation de 146 400 ha pour la période 2012-2019, la production de 5640 T de l'huile d'argane, et l'exportation de 1348 T de l'huile d'argane en 2019 (MAPM, 2022). Le contrat programme nouvelle génération de la filière de l'argane 2021-2030 vient compléter les objectifs du PMV et prévoit une réhabilitation de l'arganeraie sur une superficie de 200 000 ha pour cumuler 400 000 ha à l'horizon 2030. Le contrat

programme prévoit également le développement de l'arboriculture sur une superficie de 50 000 ha (MAPM, 2022). En termes d'exportations, un taux de croissance annuel moyen de 12% a été enregistré entre 2008 et 2020. Pourtant, la filière a diminué ses exportations de -18% entre 2019 et 2020, suite aux conséquences de la pandémie. Le Maroc exporte l'huile d'argane vers plus de 100 pays. Les parts les plus importantes vont vers la France (37%), États-Unis (16%) et l'Allemagne (13%) d'après les statistiques officielles de l'huile d'argane fournies par l'établissement autonome de contrôle et de coordination des exportations (Morocco Foodex).

Avec l'augmentation des exportations, l'huile d'argane peut être sujet des falsifications par des huiles moins chères ou par des fraudes liées à l'origine géographique. Pour cela les autorités marocaines ont instauré le label IGP dans le but d'assurer l'origine géographique, la traçabilité du produit et la qualité (Kharbach *et al.*, 2017). Cependant, ce label doit être contrôlé. A ce propos, de nombreuses approches récentes ont été utilisées pour l'identification de l'origine géographique de l'huile d'argane, telles que la composition en acides gras, en tocophérols, l'empreinte infrarouge à transformée de Fourier et la composition en isotopes stables combinées à des outils chimométriques (Ait Aabd *et al.*, 2013 ; Kharbach *et al.*, 2018 ; Aithammou *et al.*, 2019 ; Taous *et al.*, 2020 ; Elgadi *et al.*, 2021b, Elgadi *et al.*, 2021c).

La recherche isotopique a connu un développement important au cours des 60 dernières années (Taous *et al.*, 2020). Elle est utilisée dans le domaine de l'écologie, de la géochimie, de la biochimie et de l'environnement (Taous *et al.*, 2020). L'analyse isotopique des huiles peut aider à comprendre l'impact des paramètres écologiques (altitude, température, précipitations...) sur la période de développement des graines (Elgadi *et al.*, 2021b). Les résultats permettent généralement le développement d'outils analytiques performants pour vérifier l'origine géographique des huiles d'argane.

La prédiction de l'origine géographique des huiles végétales et celle de l'arganier en particulier a toujours suscité l'intérêt de la communauté scientifique spécialisée. Par conséquent, nous avons détecté une absence des études exhaustives au centre Ouest Marocain. Les échantillons sujets de l'analyse doivent être extraits dans des conditions contrôlables au laboratoire. Le milieu (l'origine géographique) présente plusieurs interactions complexes notamment la géologie, le climat, la flore... La détermination des marqueurs de l'origine géographique ne peut pas être concrétisée en absence d'une matrice complète sur les données du milieu et un nombre d'échantillons représentatifs et bien répartis dans la zone d'étude.

A la suite des précédentes considérations, les principaux objectifs de cette thèse sont :

- Le diagnostic écologique de la flore et de la végétation des arganeraies du centre-Ouest Marocain, par la caractérisation climatique et bioclimatique actualisées de cette dernière ;
- La détermination du potentiel réel en tocophérols de l'huile d'argane des six principales provinces de l'arganier naturel en utilisant les techniques chimiométriques PCA et LDA ;
- La caractérisation de la composition de l'huile d'argane en acides gras et en isotopes stables et de combiner les deux profilages, associée à la technique chimiométrique LDA, pour discriminer les huiles d'argane selon leur origine géographique ;
- La valorisation des plantes oléagineuses de l'aire de l'arganeraie, le cas de l'étude de la teneur en huile, des indices de qualité et de composition en acides gras, tocophérol et stérols des deux sous-espèces d'*Olea europaea* : subsp. *maroccana* et la subsp. *europaea* var. *sylvestris* co-habitanes dans l'arganeraie de la province d'Agadir, région des Ida Ou Tanane.
- La mise en place d'une base de données SIG comportant les données géographiques, géologiques, climatiques, bioclimatiques, du couvert végétal, des compositions chimique et isotopique de chaque point échantillonné dans l'aire des arganeraies étudiées. Ainsi que l'élaboration d'une carte interactive permettant l'accès rapide à l'information par la digitalisation des résultats obtenus dans ce travail.
- La contribution à la mise à jour de la norme NM.08.5.090 de l'huile d'argane, par la comparaison des seuils établis avec nos résultats et ceux de la bibliographie afin de refléter au niveau de cette norme le vari potentiel des huiles d'argan pour un meilleur contrôle dans le marché mondial comme produit de terroir de la zone Centro-occidentale marocaine.

Organisation de la thèse

La pluridisciplinarité de ce travail impose la présentation de la méthodologie propre à chaque chapitre séparément :

Après une première contextualisation de la problématique dans l'introduction générale, n'ayant pas la prétention d'être exhaustive, elle tente toutefois d'informer le lecteur sur les différents aspects qui touchent à l'arganier, de point de vue écologique, botanique, socioéconomique et chimique. Les chapitres de la thèse comprennent une introduction

accompagnée d'une synthèse bibliographique explicite. Afin de répondre rigoureusement à la problématique initiale, les chapitres suivants correspondent respectivement aux objectifs spécifiques énoncés précédemment ; trois chapitres ont été publiés, et présentés ici sous forme d'articles scientifiques originaux.

Le premier chapitre de ce travail présente une caractérisation exhaustive de la zone d'étude, avec une focalisation sur les analyses floristique et phyto-écologique des groupements végétaux individualisés au sein des 7 provinces et région du Maroc Centro-occidental. Ces analyses multidimensionnelles ont permis de caractériser les 83 points relevés par leur modalités des variables liées à leur altitude, leur climat, leur bioclimat et leur groupements végétaux, en se basant essentiellement sur la fréquence des espèces de la flore pérenne et essayer d'expliquer le groupement végétal correspondant et sa relation avec la composition chimique et isotopique de l'huile présentée dans la discussion générale de ce document. C'est la raison pour laquelle ce diagnostic floristique a paru essentiel pour mettre en valeur les relations entre les conditions écologiques et les groupements pour tirer des conclusions consistantes afin d'expliquer l'impact de l'origine géographique.

Par la suite, le deuxième chapitre de ce travail traite l'identification précise des différents marqueurs de l'origine géographique pour la protection et la valorisation de l'huile d'argan. À travers ce chapitre, il est question d'exposer le potentiel de la concentration en tocophérols comme un outil de discrimination de l'origine géographique de l'huile d'argan en utilisant les techniques chimiométriques de prédiction.

Le troisième chapitre vient pour compléter le précédent par l'étude de la composition en acides gras et en isotopes stables de l'huile d'argane. En fait, les deux composants sont considérés comme des paramètres chimiques essentiels pour une prédiction fiable de l'origine géographique de l'huile d'argane. Pour ce faire, les échantillons collectés au niveau des arganeraies des 7 provinces et régions différentes, ont été analysés par chromatographie en phase gazeuse (CG-FID) pour la détermination de leur composition en acides gras et par spectrométrie de masse du rapport isotopique (IRMS) pour leurs isotopes stables.

Le quatrième chapitre traite la valorisation des plantes oléagineuses d'oliviers accompagnant l'arganier. Il s'agit de l'étude de la sous-espèce méditerranéenne répandue *Olea europaea* subsp. *sylvestris* (le fameux oléastre) et la sous-espèce micro-endémique *Olea europaea* subsp. *maroccana*. L'objectif de cette étude est de mettre la lumière sur cette sous espèce très peu étudiée donc la détermination de la teneur en huile et la composition chimique et la comparaison de leurs propriétés pendant deux années consécutives (2017 et 2018) dans la même zone géographique de la région d'Ida Outanane. Les compositions en acides gras et en

stéroïdes ont été analysées par CG-FID. En outre, la teneur en tocophérols a été déterminée par HPLC.

Dans le Chapitre 5, l'importante étude cartographique effectuée dans le cadre de cette recherche, permettant de mettre à la disposition des lecteurs, des gestionnaires et des praticiens une carte interactive inédite (plan d'ensemble) en combinant toutes les données cartographiques élaborées par le SIG pour chaque point relevés dans l'arganeraie du centre-ouest marocain.

Le sixième chapitre de ce travail concerne une proposition d'actualisation de la norme marocaine de l'huile d'argane, permettra ainsi une mise en évidence du vrai potentiel de la composition chimique de l'huile d'argane afin de mieux valoriser et contrôler cette huile précieuse à l'échelle nationale et internationale.

Une discussion générale a été réalisée dans le but de présenter l'ensemble des résultats de cette recherche et d'approcher d'une façon générale les différentes interactions entre les modalités des variables du milieu, le cortège floristique et la composition chimique et isotopique des huiles.

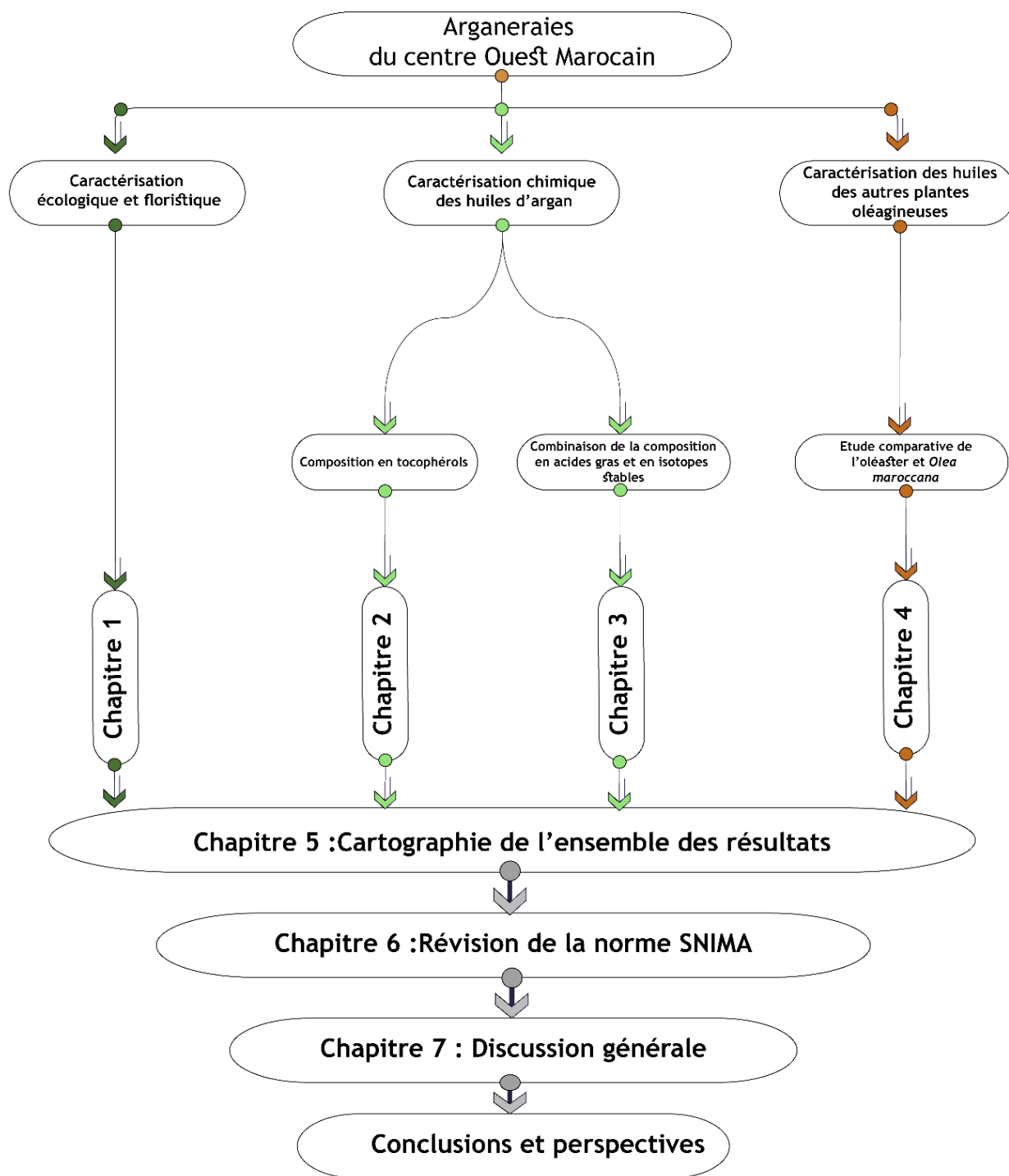


Figure A. Organigramme de la thèse

Références

- Aabd, N. A., El Asbahani, A., El Alem, Y., El Finti, A., Msanda, F., & El Mousadik, A. (2013). Variation in oil content and fatty acid composition in preselected argan trees with morphological characters and geographical localization. *Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism*, 6(3), 217-225. <https://doi.org/10.1007/s12349-013-0134-2>
- Abreu A.C., Borges A., Malheiro A.F. & Simoes M. (2013). Resurgence of the interest in plants as sources of medicines and resistance-modifying agents. In book: Microbial pathogens and strategies for combating them: science, technology and education. Chapter: Resurgence of the interest in plants as sources of medicines and resistance-modifying agents. Publisher: Formatex Research Center. Editors: A. Méndez-Vilas.
- Adlouni, A. (2010). L'huile d'argane, de la nutrition à la santé. *Phytothérapie* 8, 89-97. <https://doi.org/10.1007/s10298-010-0538-9>
- Aithammou, R., Harrouni, C., Aboudlou, L., Hallouti, A., Mlouk, M., Elasbahani, A., & Daoud, S. (2019). Effect of clones, year of harvest and geographical origin of fruits on quality and chemical composition of Argan oil. *Food chemistry*, 297, 124749. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.024>
- APG, IV. (2016) "The linnean society of London." *Botanical journal of the linnean society* 181: 1-20.
- Benabid A. et Fennane M. (1994). Connaissances sur la végétation du Maroc : Phytogéographie, phytosociologie et séries de végétation. *L.azaroa* 14 : 21-97
- Benabid, A. (2000). Flore et Ecosystèmes du Maroc. Evaluation et préservation de la biodiversité. Paris: Ibis Press.
- Charrouf Z. (1995) L'arganier, patrimoine marocain et mondial à sauvegarder et à protéger: mini-revue sur la composition chimique et sur les essais de valorisation. *Al Biruniya. Revue Marocaine de Pharmacognosie*. 2: 119-126.
- Charrouf, Z., & Guillaume, D. (2002). Secondary metabolites from *Argania spinosa* (L.) Skeels. *Phytochemistry Reviews*, 1(3), 345-354.
- Charrouf, Z., & Guillaume, D. (2008). Argan oil: Occurrence, composition and impact on human health. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 110(7), 632-636.
- Cherki, M., Derouiche, A., Drissi, A., El Messal, M., Bamou, Y., Idrissi-Ouadghiri, A., ... & Adlouni, A. (2005). Consumption of argan oil may have an antiatherogenic effect by improving paraoxonase activities and antioxidant status: Intervention study in healthy men. *Nutrition, metabolism and cardiovascular diseases*, 15(5), 352-360.
- De Waroux, Y. L. P., & Lambin, E. F. (2012). Monitoring degradation in arid and semi-arid forests and woodlands: the case of the argan woodlands (Morocco). *Applied Geography*, 32(2), 777-786.
- El Monfalouti, H., Guillaume, D., Denhez, C., & Charrouf, Z. (2010). Therapeutic potential of argan oil: a review. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 62 (12), 1669-1675.
- Elgadi, S., Ouhammou, A., Zine, H., Maata, N., Aitlhaj, A., El Allali, H., & El Antari, A. (2021). Discrimination of Geographical Origin of Unroasted Kernels Argan Oil (*Argania spinosa* (L.) Skeels)

Using Tocopherols and Chemometrics. Journal of Food Quality, 2021.
<https://doi.org/10.1155/2021/8884860>

Elgadi, S.; Ouhammou, A.; Taous, F.; Zine, H.; Papazoglou, E.G.; Elghali, T.; Amenouz, N.; El Allali, H.; Aitlhaj, A.; El Antari, A. (2021). Combination of Stable Isotopes and Fatty Acid Composition for Geographical Origin Discrimination of One Argan Oil Vintage. *Foods*, 10, 1274.
<https://doi.org/10.3390/foods10061274>

Emberger L., (1938)- Les arbres du Maroc et comment les reconnaître. Larose, éditeurs, Paris, 318 p.

Emberger L. (1939) – Aperçu général sur la végétation du Maroc. Mémoire hors-série de la Société de Sciences Naturelles du Maroc, 157 pages, 1 carte hors-texte.

Fennane M. & Ibn Tattou M., (1998) - Catalogue des plantes vasculaires rares, menacées ou endémiques du Maroc. *Bocconea* 8, 243p.

Ferradous A., (2018) - Optimisation de la production de plants d'arganier (*Argania spinosa* (L.) Skeels) en pépinière. Thèse, Université Cadi Ayyad, 170 p.

Gharby, S., Harhar, H., El Monfalouti, H., Kartah, B., Maata, N., Guillaume, D., & Charrouf, Z. (2012). Chemical and oxidative properties of olive and argan oils sold on the Moroccan market. A comparative study. *Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism*, 5(1), 31-38.

Gharby, S., Harhar, H., Guillaume, D., Haddad, A., Matthäus, B., & Charrouf, Z. (2011). Oxidative stability of edible argan oil: A two-year study. *LWT-Food Science and Technology*, 44(1), 1-8.

Guillaume, D., & Charrouf, Z. (2011). Argan oil and other argan products: Use in dermocosmetology. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113(4), 403-408
<https://doi.org/10.1002/ejlt.201000417>

Harhar, H., Gharby, S., Kartah, B., El Monfalouti, H., Guillaume, D., & Charrouf, Z. (2011). Influence of argan kernel roasting-time on virgin argan oil composition and oxidative stability. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66(2), 163-168.

Kharbach, M., Kamal, R., Mansouri, M. A., Marmouzi, I., Viaene, J., Cherrah, Y., Alaoui, K., Vercammen, J., Bouklouze, A., Heyden, Y. (2018). Selected-ion flow-tube mass-spectrometry (SIFT-MS) fingerprinting versus chemical profiling for geographic traceability of Moroccan Argan oils. *Food chemistry*, 263, 8-17. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.059>

Kharbach, Y., Qachchachi, F. Z., Haoudi, A., Tourabi, M., Zarrouk, A., Jama, C., Olasunkanmief, L., Ebenso, E., Bentiss, F. (2017). Anticorrosion performance of three newly synthesized isatin derivatives on carbon steel in hydrochloric acid pickling environment: electrochemical, surface and theoretical studies. *Journal of Molecular Liquids*, 246, 302-316. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.09.057>

MAPM (2022), Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts <https://www.agriculture.gov.ma/fr/filiere/arganier> (consulté en Mai 2022)

M'hirit O, Benzyane M, Benchekroun F, El Yousfi SM, Bendaanoun M (1998) L'arganier, une espèce fruitière forestière à usages multiples. Mardaga, Sprimont, Belgique, pp. 145-150.

Mokhtari N., R. Mrabet, P. Lebailly, L. Bock. (2014). *Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc*. Rev. Mar. Sci. Agron. Vét. 2 (1):50-66

Msanda F, El Aboudi A, Peltier J.P. (2005). Biodiversité et biogéographie de l'arganeraie marocaine Cahiers. Agricultures 14(4):357–364.

Peltier J.P. (1982). La végétation du bassin versant de l'oued Souss (Maroc). Thèse de doctorat ès-sciences. Université scientifique et médicale de Grenoble, 201p.

Taous, F., Amenzou, N., Marah, H., Maia, R., Maguas, C., Bahmad, L., & Kelly, S. (2020). Stable isotope ratio analysis as a new tool to trace the geographical origin of Argan oils in Morocco. *Forensic Chemistry*, 17, <https://doi.org/10.1016/j.forc.2019.100198>

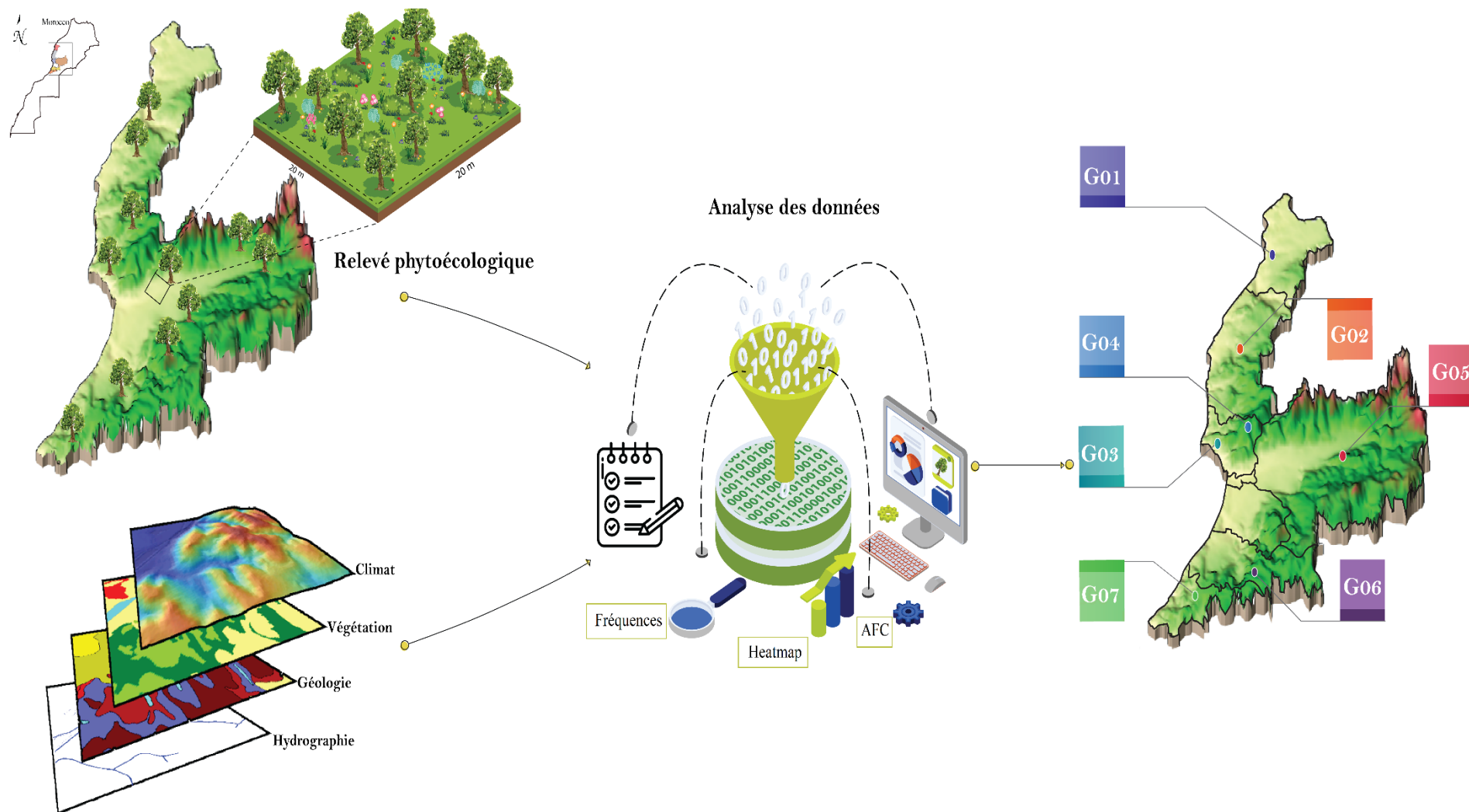
Teixidor-Toneu, I., Elgadi, S., Zine, H., Manzanilla, V., Ouhammou, A., & D'Ambrosio, U. (2021). Medicines in the Kitchen: Gender Roles Shape Ethnobotanical Knowledge in Marrakshi Households. *Foods*, 10(10), <https://doi.org/10.3390/foods10102332>

Chapitre 1

Présentation générale de la zone du centre Ouest du Maroc

Après une première contextualisation de la problématique dans l'introduction générale, ce chapitre (1) présente une caractérisation exhaustive de la zone d'étude, avec une focalisation sur les analyses floristique et phyto-écologique des groupements végétaux individualisés au sein des 7 provinces et région du Maroc Centro-occidental. Ces analyses multidimensionnelles ont permis de caractériser les 83 points relevés par leurs modalités des variables géographique, bioclimatiques et leurs groupements végétaux, en se basant essentiellement sur la fréquence des espèces de la flore pérenne et essayer d'expliquer le groupement végétal correspondant et sa relation avec la composition chimique et isotopique de l'huile présentée dans la discussion générale de ce document. C'est la raison pour laquelle ce diagnostic floristique a paru essentiel pour mettre en valeur les relations entre les conditions écologiques et les groupements pour tirer, par la suite, des conclusions consistantes afin d'expliquer l'impact de l'origine géographique.

Résumé graphique



INTRODUCTION

La zone étudiée concerne le territoire géographique localisé dans le **Centre-Ouest du Maroc** (ex. zone Sud-Ouest) circonscrivant latitudinalement entre le Sud de Safi jusqu'à l'Oued Draa et longitudinalement jusqu'à l'Est de Taroudant, vers la localité d'Aoulouz. La vallée de l'Oued Souss y constitue son secteur central.

Elle présente une importance capitale par ses caractéristiques abiotiques et biotiques. Elle est ainsi considérée comme une zone de refuge au sein du hotspot méditerranéen et un carrefour biogéographique où viennent se rencontrer des éléments phytogéographiques variés (Peltier, 1982). Elle montre une originalité naturelle inédite au sein du Maroc (Benabid, 2013). Cette originalité s'établit au point de vue (i) climatique, exprimé par un hiver tempéré, chaud à très chaud et un été chaud mais à influence océanique entretenant une humidité atmosphérique qui compense en partie la rareté des précipitations et en atténuant ainsi l'impact de la période sèche, (ii) type d'étage de végétation par l'individualisation du spécifique étage Inframéditerranéen au sens de Benabid (1976), (iii) floristique révélé par la richesse, la diversité de la flore représentée par des éléments méditerranéens, sahariens, tropicaux, macaronésiens et par un important lot d'espèces de plantes endémiques, rares et menacées (Blanquet et Maire, 1924 ; Benabid et Fennane, 1994 ; Géhu et Biondi, 1996, Fennane et Ibn Tatou, 1998 ; Médail et Quézel, 1999).

La végétation de ce secteur, qualifiée de secteur de l'arganier, est le reflet crucial de ses conditions environnementales et écologiques (Emberger, 1939 ; Peltier, 1982 ; Médail & Quézel, 1999). Elle correspond à l'écorégion de l'arganeraie dominée par l'arganier, *Argania spinosa* (L.) Skeels, arbre patrimonial national et universel de cette zone (Benabid et Melhaoui, 2013). C'est un genre monospécifique, le seul représentant de la flore tropicale et de la famille des Sapotacées au Maghreb (Emberger, 1938 ; Emberger, 1939 ; Peltier, 1982 ; Swenson et Anderberg, 2005). C'est l'essence la plus originale et la plus remarquable de l'Afrique du Nord, tant par son intérêt botanique que par sa valeur sociale (Boudy, 1950). C'est un arbre à multi-usage, forestier, fruitier et fourrager (Naggar, 2018). Il constitue une ressource phytogénétique au point de vue environnemental, écologique et socio-économique. Du fait de sa qualité d'arbre oléagineux par sa teneur en huile extraite de ses fruits, l'arganier reconnaît un regain d'intérêt par ses intérêts culinaires, phytothérapeutiques et en cosmétique comme agent revitalisant la peau et les cheveux (Benabid et Fennane, 1994 ; Bellakhdar, 1997). Par ces nombreux services écosystémiques, il est la clé de voute de toute la zone du Centre-Ouest

marocain et dont la disparition compromettrait la structure et le fonctionnement de tous ses écosystèmes (Faouzi *et al.*, (2015).

L'arganeraie couvre une superficie de plus 830 000 ha (Peltier, 1982 ; Msanda *et al.*, 2005 ; Naggar, 2018), essentiellement encartée dans la plaine du Souss, Anti-Atlas et la région d'Essaouira et dont une grande partie appartenant à la Réserve de Biosphère de l'Arganeraie (RBA) créée en 1998 et visant sa gestion et sa conservation durables de la surexploitation dont elle est assujettie (Msanda *et al.*, 2021). Dans toute son aire de répartition, l'arganeraie est assez diversifiée par la qualité de sa biodiversité floristique et faunistique renfermant des espèces à forte valeur patrimoniale (Peltier, 1982 ; Msanda, 2005). Cette diversité affecte également la qualité et la composition chimique de l'huile d'argane en fonction de ses origines géographiques et des conditions écologiques (Elgadi *et al.*, 2021b ; Elgadi *et al.*, 2021c).

Ses limites sont fixées par le climat ; le sol ne paraît y jouer aucun rôle (Emberger, 1925) mais exclues des sables mobiles profonds (M'hirit, 1998). La zone côtière du centre-ouest du Maroc, s'encartant dans le '**secteur macaronésien marocain**', est l'une des régions les plus remarquables d'Afrique du Nord, en raison de ses paysages végétaux et aussi de la nature unique de sa flore (Médail & Quézel, 1999). L'emplacement de la zone Centro-occidentale à la limite du domaine saharien lui confère un rôle primordial dans la lutte contre la désertification et considéré comme le dernier rempart face à l'avancée du désert dans la zone Centro-occidentale (Naggar, 2018).

La zone du Centre-Ouest fait partie des sites les plus explorés du Maroc. Historiquement, les premières investigations sur la flore et la végétation, reportées par Peltier (1982), ont débuté au XIX^e siècle. Elles s'étaient renforcées au XX^e siècle par les travaux de biogéographes et botanistes nationaux et étrangers. Plus récemment, ces investigations ont continué sur des aspects de valorisation et conservation de l'écosystème Arganier, sous les auspices de l'ONDZOA. L'organisation du Congrès international annuel sur la recherche abordant cette essence multi-usage a contribué à sa valorisation scientifique. La mise en place de la Réserve de Biosphère de l'Arganeraie (RBA), et d'aires protégées représentées par des Sites d'Intérêt Biologique et Ecologique (SIBE) et le parc national (Sous Massa) ont donné un regain d'intérêts à cette zone du Maroc Centro-occidental. L'intention s'est dirigée aussi vers la mise en fonction d'un site web (**www.teline.fr**) sur la flore et la végétation qui vise leur promotion et leur connaissance auprès du grand public. La concrétisation de ces démarches et efforts ont conduit, depuis l'année 2021, les Nations Unies à désigner le 10 mai de chaque année,

la Journée Internationale de l'Arganier. Ce qui est une fierté nationale et une reconnaissance internationale de l'Arganier et de son Ecosystème.

L'objet de ce chapitre est de présenter la zone du Centre-Ouest marocain par un aperçu physiographique, climatique, bioclimatique et par ses diversités floristiques et végétales afin de permettre l'actualisation des données les concernant. Il vise d'approcher la certification et la caractérisation de l'huile d'argane, réputée pour ses qualités diététiques et cosmétiques, par ses origines géographiques, écologiques et botaniques dont la connaissance et la valorisation sont tant attendues par les gestionnaires et les usagers pour sa valorisation durable. Un ensemble de 83 points relevés représentatifs des arganeraies échantillonnées dans le cadre de la présente étude sont étudiés.

I. Caractéristiques physiographiques

I.1 Situation générale

La zone d'étude se situe au Centre-Ouest du Maroc, précisément entre les latitudes 29°08' Nord et 32°02' Nord et les longitudes 08°00' Ouest et 10°09' Ouest. Au point de vue administratif, six provinces et régions occupent le territoire de la zone d'investigation. Il s'agit, du Nord au Sud, de Safi, Essaouira, Agadir, Taroudant, Tiznit, Sidi Ifni et la région des Ida Outanane et de Guelmim à Bouizakerna. La région est très diversifiée du point de vue de ses formations géologiques et géomorphologiques, elle est composée essentiellement des plateaux à Chiadma Nord et Sud, les hauts plateaux à Haha et Ida Outanane, les bassins d'Essaouira et d'Agadir, le bassin du Souss, le versant sud du Haut Atlas et Sud-Occidental de l'Anti-Atlas. La zone est limitée par deux Oueds : Oued Tensift au nord et Oued Noun au sud avec une occupation remarquable au centre de cette zone par oued Souss (Fig. 1).

I.2 Aspects géologique, géomorphologique et hydrologique

I.2.1 Aspect géologique

Le plateau Chiadma Nord, situé entre Safi et Essaouira, se caractérise par la présence des plateaux calcaires de caractère karstique (Weisrock & Lunski, 1987). Les plateaux de Chiadma, Haha et le bassin de Sous sont dominés par les marnes, les grès molassiques et les calcaires lacustres qui constituent le matériel de remplissage du néogène et quaternaire (Fig. 2). Le massif montagneux des Ida Outanane, situé dans la terminaison Ouest du Haut Atlas occidental, est constitué de dolomies et de marnes composant la couverture secondaire (Lias et Jurassique) fortement plissée (Piqué, 2007 ; Saidi 1982).

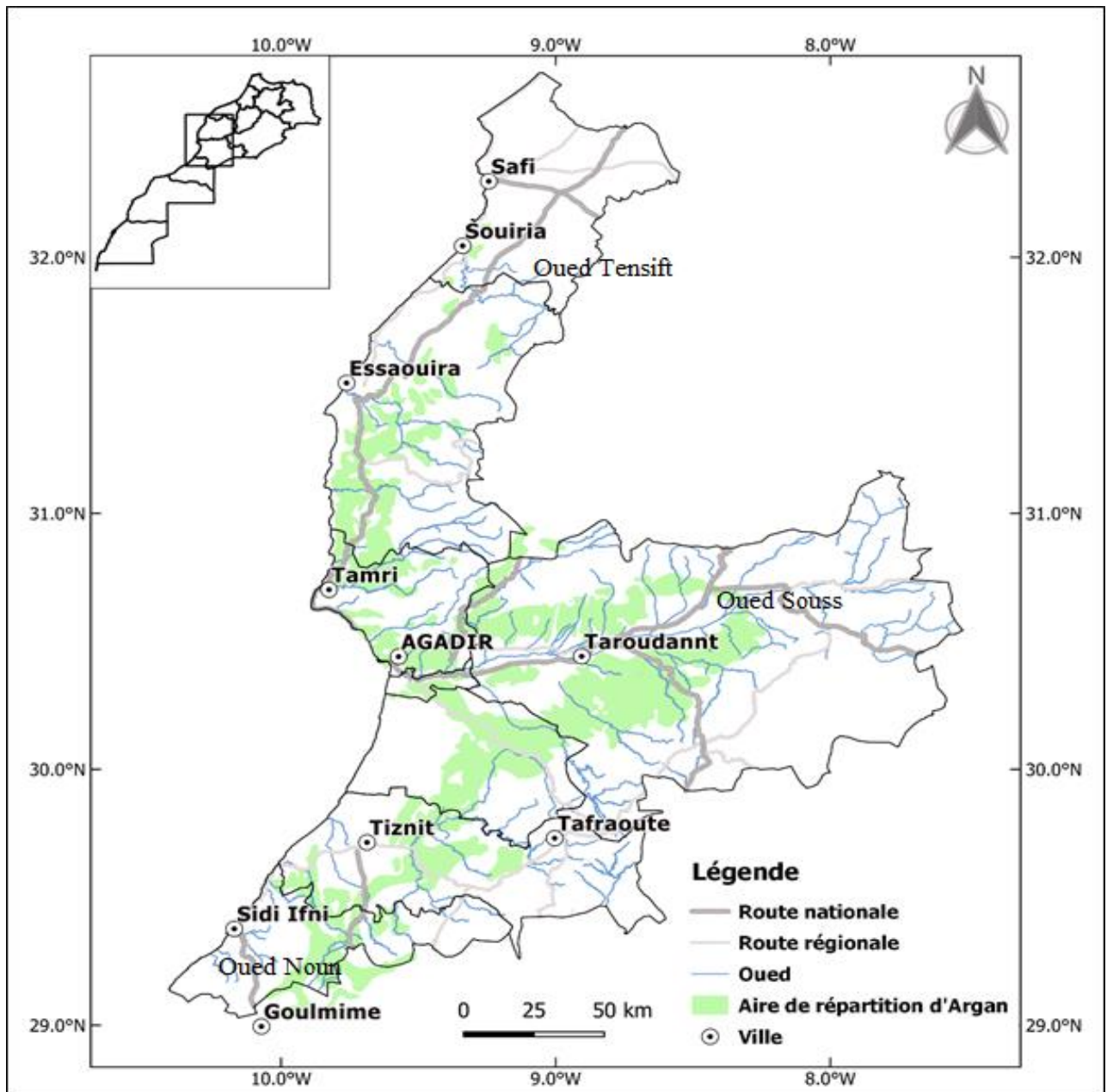


Figure 1. Présentation géographique du Centre-Ouest du Maroc

Le versant sud du Haut Atlas est géologiquement diversifié, il est dominé essentiellement par des grès, conglomérats et argiles rouges appartenant au permo-trias et par les schistes et les quartzites constituant le cambrien, l'ordovicien et le silurien avec une présence exclusive des granites hercyniens. L'Anti-Atlas est un vieux massif paléozoïque se caractérisant par la dominance de l'âge Adoudounien ou Infracambrien supérieur et Géorgien avec des dépôts détritiques et volcanites (Piqué, 2007 ; Saidi 1982).

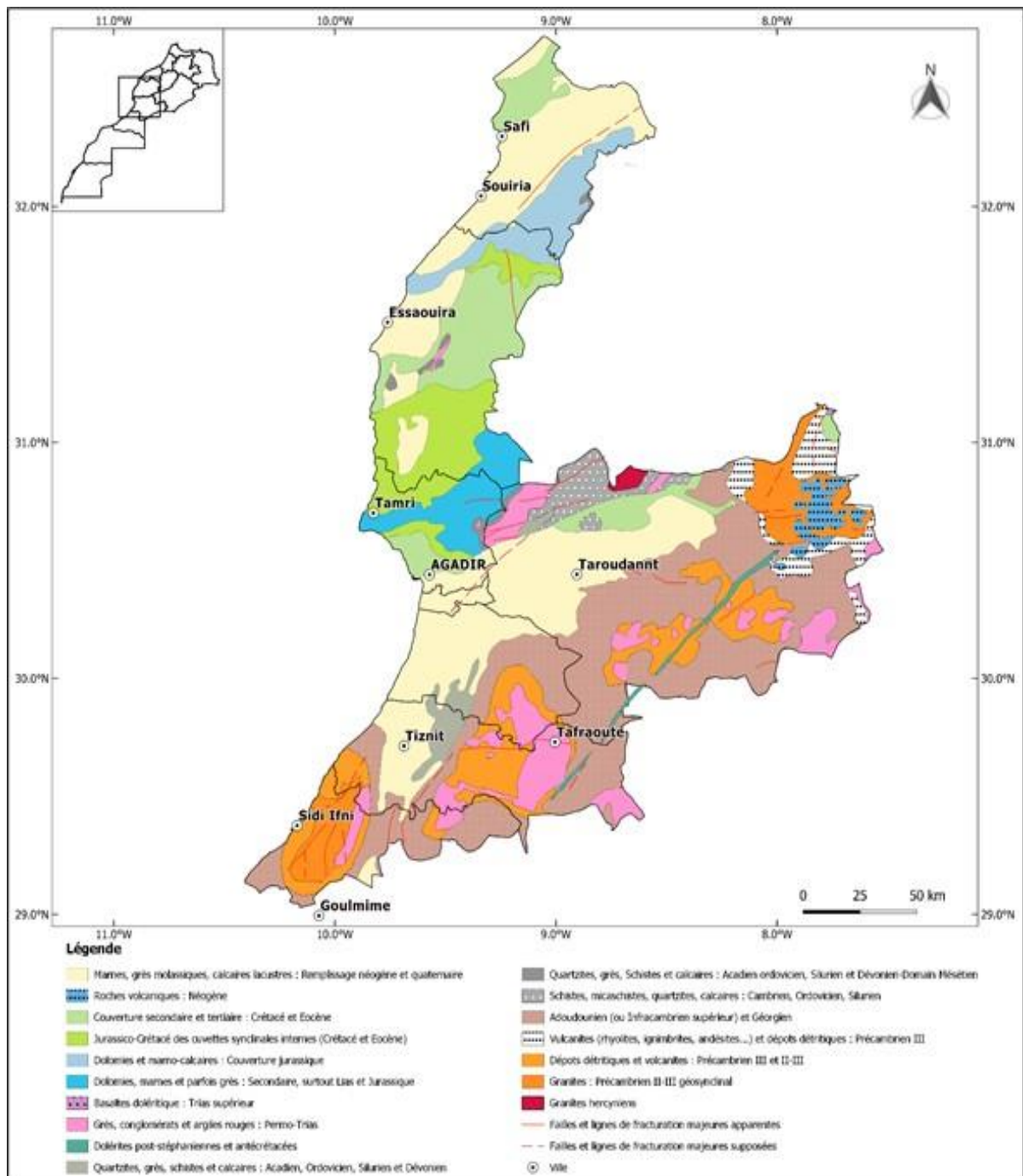


Figure 2. Carte géologique du Centre Ouest Marocain (élaborée par l'auteur sur la base de la carte de Saadi et *al.*, (1982)

I.2.2 Aspects géomorphologiques

Les régions étudiées présentent une grande diversité géomorphologique résultant d'une tectonique active surtout dans le versant sud du Haut Atlas (Piquet, 2007). La bande côtière se caractérise par des basses altitudes allant de 38 à 100m et constituée essentiellement des plateaux et plaines. La plaine de Sous se distingue par une forme triangulaire délimitée par les montagnes du Haut Atlas et de l'Anti Atlas et ouverte sur l'Océan Atlantique avec un prolongement au sud par les plaines et plateaux de Massa et de Tiznit (Fig. 3). L'Anti-Atlas correspond à un gigantesque bombement de fond avec une forte érosion qui a permis l'affleurement des couches plus anciennes du précambrien sous forme de boutonnières ou de vaste dépression (Peltier, 1982).

La zone d'étude peut être subdivisée en quatre unités géomorphologiques qui sont :

- La zone littorale, allant du Sud de l'Oued Tensift jusqu'à Sidi Ifni ;
- Le Haut Atlas Occidental avec les massifs de Ida Outanane et le couloir d'Argana ;
- Le bassin de Sous, les plaines de Chtouka et de Tiznit ;
- L'Anti-Atlas.

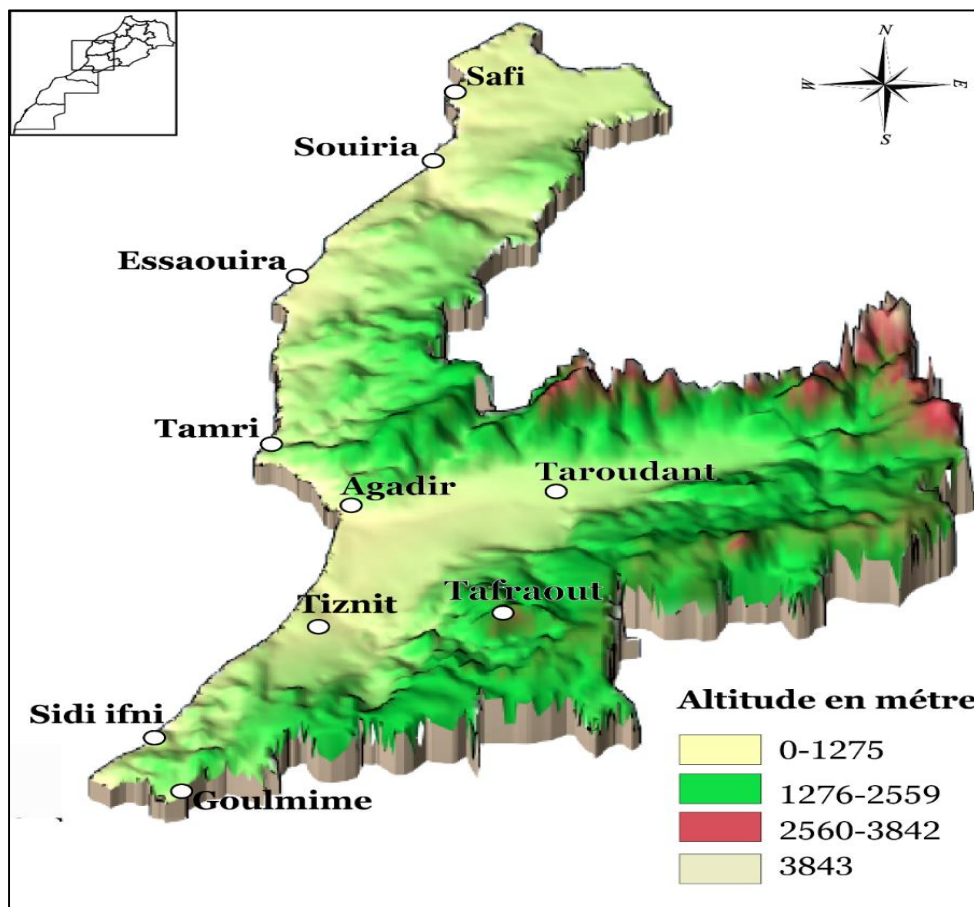


Figure 3. Carte de la diversité géomorphologique de la zone du Centre-Ouest du Maroc assemblé par l'auteur.

I.2.3 Aspect hydrologique

Le réseau hydrologique de la zone d'étude détient un nombre important des oueds (Fig.

4). Il se distingue par :

- L'oued Tensift qui draine les eaux des bassins versants du Haut Atlas Occidental ;
- Oued Ksob qui prend son origine dans piémont occidental de la zone sub-atlasique ;
- Oued Issen qui coule dans le couloir d'Argana ;
- Oued Souss et ses affluents : originaires du massif de Toubkal. Il est le plus important cours d'eau dans la zone du Centre-Ouest du Maroc ;
- Oued Massa fait partie d'un petit bassin drainant l'Anti-Atlas Occidental aux environs d'Anzi ;
- Oued Noun part du versant sud de l'Anti-Atlas et se jette dans l'océan Atlantique (Foum Assaka), au Sud de Sidi Ifni.

La zone d'étude est caractérisée également par la présence des barrages notamment barrage Moulay Abderahman sur oued Ksob, barrage d'Abdelmoumen sur l'oued Issen, barrage Moulay Abdellah sur oued N'srou, barrage d'Aoulouz et de Mokhtar Soussi sur l'oued Souss et barrage Youssef Ben Tachefine sur l'oued Massa.

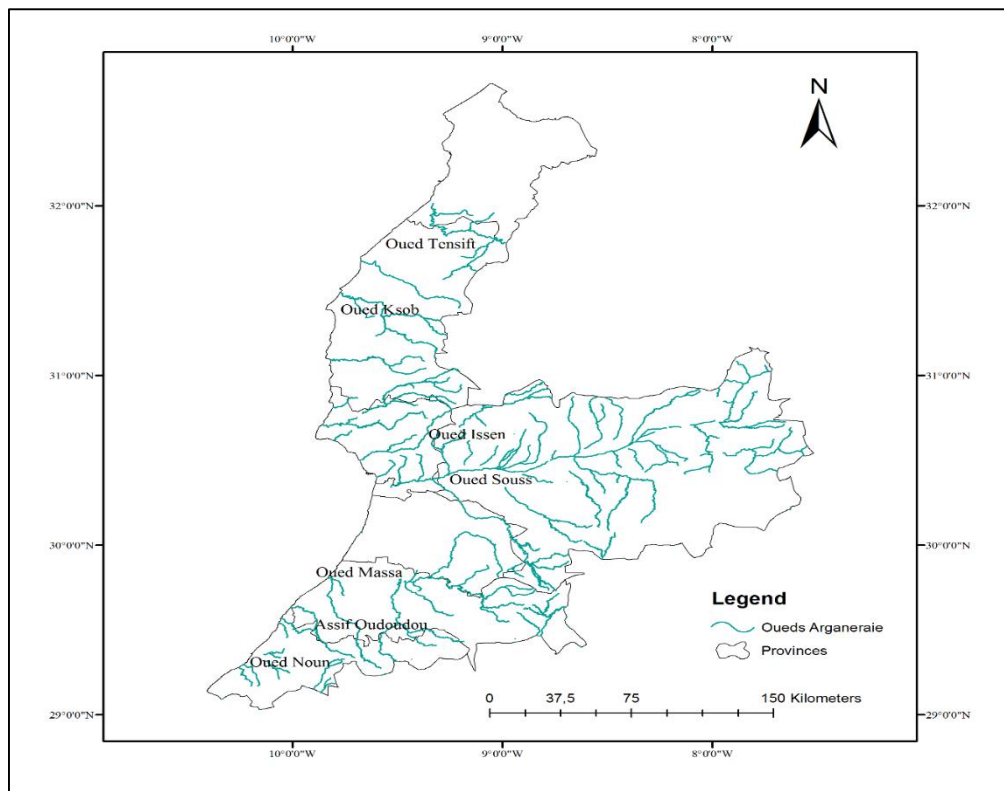


Figure 4. Réseau hydrique du Centre-Ouest marocain assemblé par l'auteur.

I.3 Aspects climatique et bioclimatique

La zone étudiée présente une grande variation d'un point de vue orographique et géographique influençant d'une manière monumentale le climat régional.

Le réseau des stations météorologiques dans la zone d'étude, permettant d'approcher les conditions climatiques à l'aide de mesures fiables et permanentes est malheureusement assez faible et de densité assez lâche. Trouver des séries continues de données climatiques nécessaires pour une étude objective du climat n'est donc pas permis (Fennane, 1982 ; Ouhammou, 2005).

Cette étude a concerné un ensemble de **83 points relevés** représentatifs des arganeraies échantillonnées dans la présente étude. Afin de pallier cette situation, les données climatiques de ces 83 points relevés analysés dans cette étude ont été téléchargées et traitées à partir du site <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (Consulté en janvier 2021) pour une série de 40 ans, de 1980 à 2020. Les données obtenues ont subi, par la suite, une correction par Multiplicative Scatter Correction (MSC) en se basant sur les données climatiques effectives collectées à partir des données de l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift, et de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) et des références en la matière Peltier (1982) et Ouhammou (2005).

I.3.1 Facteurs hydriques

I.3.1.1 Précipitations

Les précipitations sont l'un des facteurs clés du climat méditerranéen. Cet élément climatique est fortement influencé, entre autres, par la topographie et la situation géographique comme l'éloignement des océans et des centres d'action à l'origine des précipitations (Péguy, 1961).

Globalement les précipitations de ce secteur sont faibles et comprises entre 130 et 420 mm. Les résultats de leur analyse sont portés sur la **Fig. 5.A**. Ils montrent l'existence de gradients pluviométriques décroissants de direction nord-sud et un gradient croissant de direction Ouest - Est avec la présence des massifs montagneux. En ayant une situation méridionale, cet élément climatique est caractérisé par sa rareté et son irrégularité annuelle et mensuelle bien marquées.

Dans le détail, la répartition des isohyètes montre que la zone de **Souiria**, au sud de Safi, présente des précipitations annuelles élevées variant entre 290 mm (Talmest) et 337 mm (Ghabt Chouk) et de 254 mm (Had Dra) et 298 mm (Ait Daoud) dans la province d'**Essaouira**. Les

valeurs notées pour les points relevés de la province d'**Agadir** sont très variées et comprises entre 189 (Igounane) et 420 mm (Loumih) faisant partie des Ida Outanane. Cette dernière se caractérise par une variabilité des formes géomorphologiques englobant les plaines littorales et les montagnes du Haut Atlas occidental. Vers l'intérieur, plus, précisément dans la province de **Taroudant**, les précipitations diminuent, 196 mm (Ait Maalla), et 238 mm (Idrgan). Du côté de **Tiznit**, elles varient entre 156 mm (Arba Sahel) et 168 mm (Tafraoute). A **Sidi Ifni**, les précipitations sont de l'ordre de 157 mm (Mesti) et 174 mm (Tioughza). La région de **Guelmim**, à Bouizakarne, elle enregistre le total moyen pluviométrique annuel le plus faible (132 mm) au sein de la zone d'étude.

Pour le régime pluviométrique des différents points relevés étudiés, il a été calculé en utilisant le coefficient d'Angot (1907) par la formule ci-dessous :

$$Q_{\text{ANGOT}} = \text{Pluviosité saisonnière} / \text{Pluviosité annuelle} \times K$$

Avec K facteur de correction basé sur le nombre de jours de la saison (Automne (mois 9, 10 et 11) : 1000/249 ; Hiver (mois 12, 01 et 02) : 1000/247 ; Printemps (mois 3, 4 et 5) et Eté (mois 6, 7 et 8) : 1000/252)

Le régime pluviométrique dans la zone d'étude est de type "**HAPE**" mettant en évidence la dominance de la saison **hiverno-automnale**. L'hiver est la saison la plus pluvieuse pour l'ensemble des stations étudiées, les pourcentages varient entre 38,6% à Idragan, dans la région de Taroudant et 45,6% à Tamri (Agadir). Les pourcentages des précipitations d'automne sont de l'ordre de 27,9% et 30,4% enregistrés à Warwad (Taroudant) et Tiznit, respectivement. Les précipitations du printemps varient de 21,6% et 26,7% notées à Mesti, dans la province de Sidi Ifni et Warwad et enfin l'été présente les plus faibles précipitations, variant de 1,73% à 5,9% à Essaouira et Taroudant, respectivement. Les précipitations estivales élevées sont dues à l'activité orageuse, relevées dans les stations continentales d'altitude, cas d'Ighrem (5 % à 1326 m) au Sud de Taroudant.

I.3.1.2 Humidité relative

L'humidité relative correspond au pourcentage de saturation de l'air ambiant en vapeur d'eau. Fondamentalement, plus la température de l'air est élevée, plus l'air peut contenir de l'eau. C'est un paramètre très influençant du climat et de la végétation de la zone Centro-Occidentale du Maroc en liaison avec l'effet du courant marin des îles des Canaries affectant la côte atlantique du Maroc (Makaoui *et al.*, 2005). En effet, les faibles précipitations sus mentionnées

ne permettent pas à elles seules d'expliquer la densité remarquable de sa végétation arborée, l'impact de l'humidité relative enregistrée et manifestée sous forme de rosée et de brouillards, fréquents dans ce secteur, apparaît très crucial. Ils sont estimés de 20 à 50 mm d'eau s'ajoutant aux totaux des précipitations annuelles (Sauvage, 1963; Barbéro *et al.*, 1982). Le maximum de ce phénomène se produit en été. Il prend localement son importance du point de vue écologique (Peltier, 1983). Peltier (1982) signale, de plus, que l'arganier se classe parmi les condensateurs énergétiques ce qui facilite son adaptation au climat aride.

Pour mieux évaluer l'impact de cet élément climatique, une analyse de sa répartition pendant les deux saisons extrêmes, hiver et été, a été abordée (Fig. 5. B1 et 5. B2).

En hiver, les valeurs des pourcentages de l'humidité relative moyennes sont comprises entre 52% dans la province de Taroudant (Ighrem et Tiout) et 73% dans la province d'Essaouira (Had Dra). Elle est bien appréciée le long de la côte du Nord au Sud avec des valeurs relativement élevées. Vers l'intérieur, représenté dans la zone continentale localisée essentiellement dans les points relevés de la province de Taroudant, le pourcentage est plus faible, ne dépassant pas 56% (Fig. 5.B1).

En été, les valeurs du pourcentage de l'humidité relative varient de 22% à Ighrem et 74% à Souiria. Le contraste entre la région littorale et continentale est manifeste. Il montre une nette prédominance le long du littoral, plus précisément au sud de Safi, variant de 67% à Talmest et 74% à Ghabt Chouk, à Essaouira (41,5% à Ait Daoud et 72,5% à Had Dra), à Agadir (53,8% à Tamri et Imsouan) et à Sidi Ifni, 57,8% à Tiourza et 65% à Mesti. Dans les provinces de Taroudant et Tiznit les pourcentages varient de 39 % à Ighrem et 48% respectivement (Fig. 5 .B2).

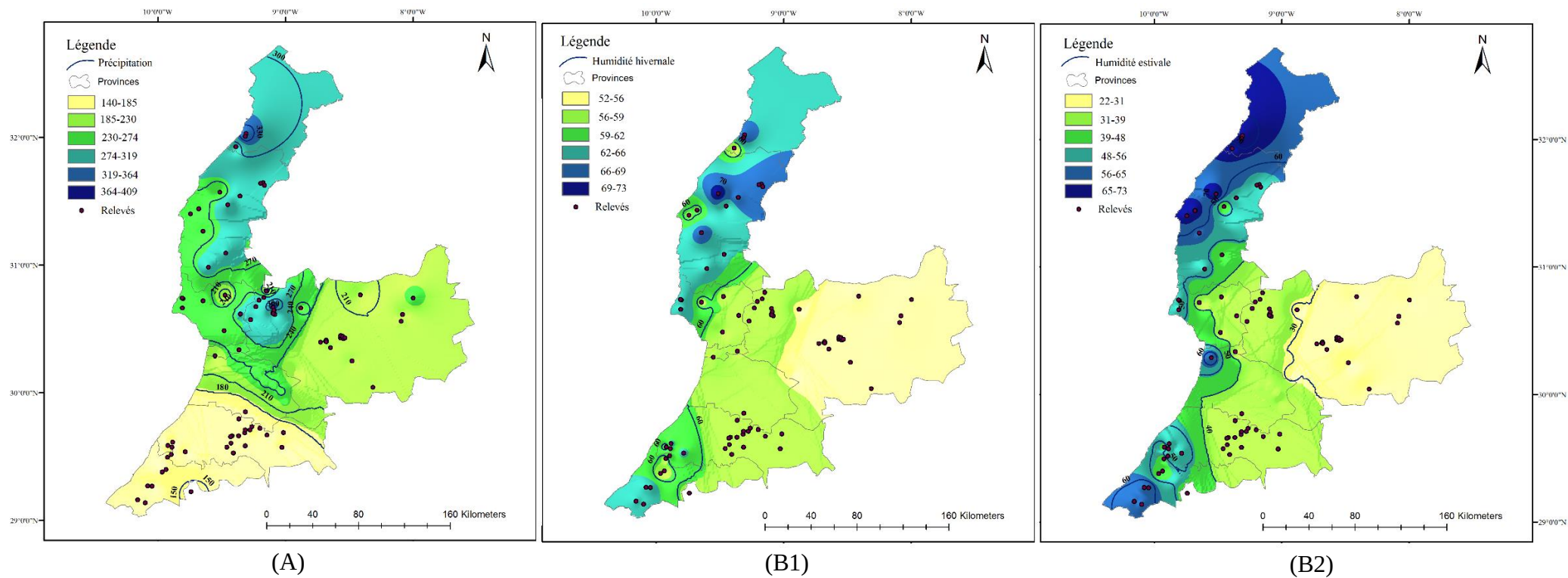


Figure 5. Répartition spatiale des tranches de précipitations (A en mm) et des taux d'humidité relative (B en %) hivernale (B1) et estivale (B2) des points relevés échantillonnés, assemblée par l'auteur.

I.3.2 Facteurs thermiques

Les résultats de l'analyse, étalée sur 40 années d'observation (1980-2020), des données thermiques de la zone d'étude sont présentées sur la **figure 6**. La figure **6.A** a été élaborée sur la base de la moyenne des températures minimales (m) du mois le plus froid (janvier). La figure **6.B** correspond à la moyenne des températures maximales (M) du mois le plus chaud (juillet ou août). L'amplitude thermique extrême (M-m) est présentée dans la figure 7.

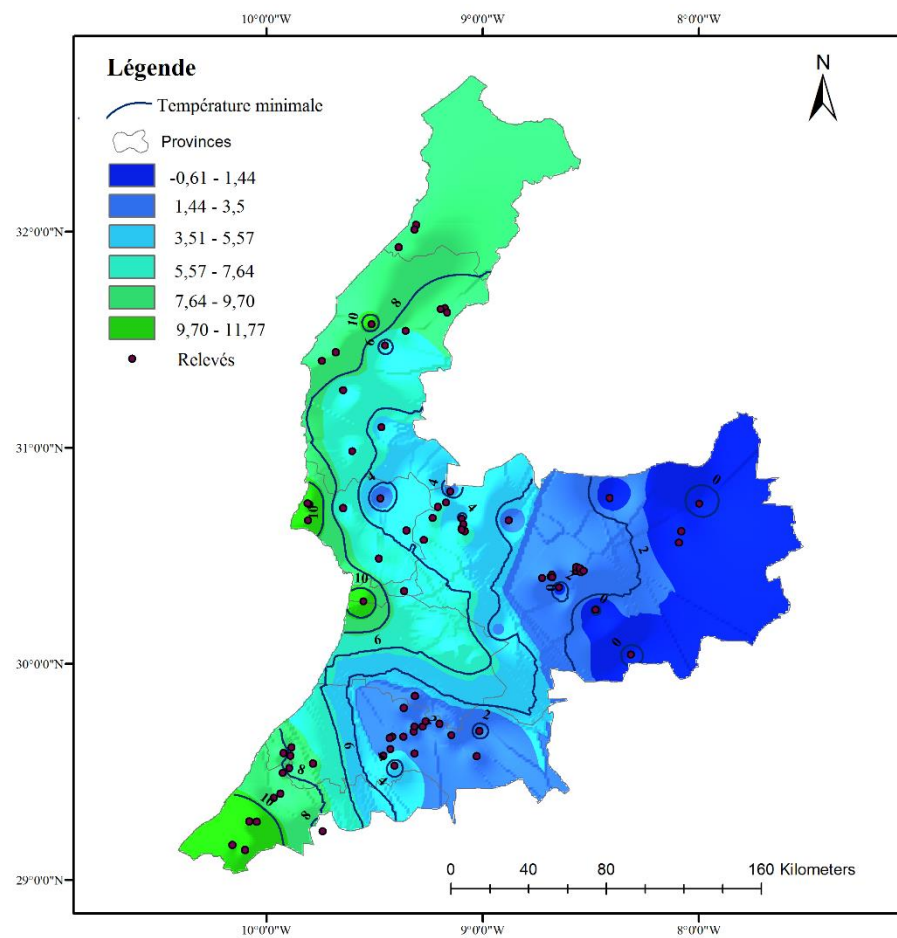
I.3.2.1 Températures minimales

Dans la zone d'étude, les températures minimales du mois le plus froid (janvier) varient de - 0,6°C à Idergan dans la région de Taroudant à 11,7°C à Mesti, près de Sidi Ifni. Les valeurs de températures minimales négatives sont exceptionnelles, enregistrées dans les stations d'altitude, à Ighrem (- 0,3°C) et à Idergan (- 0,6°C). Elles correspondent à la variante d'hiver froid au sens de Sauvage (1963). Alors que celles d'hiver tempéré (5 à 7°C) et hiver chaud (7 à 10°C), elles sont les plus communes dans la dition.

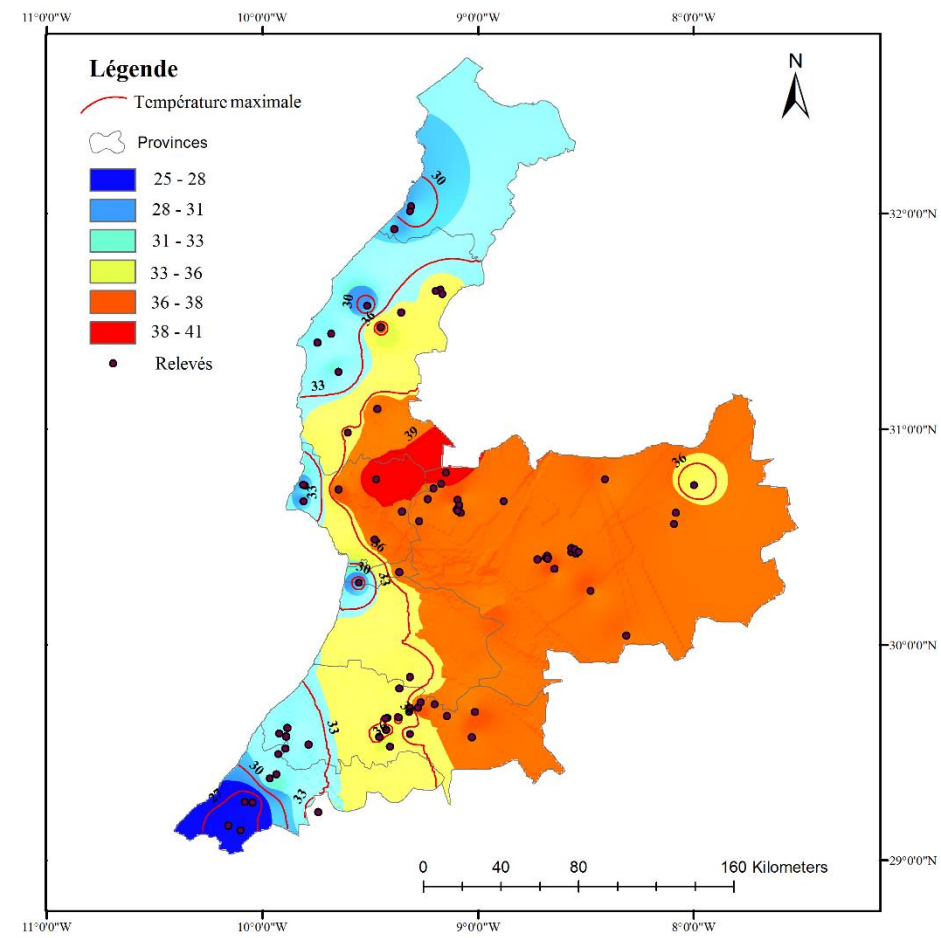
On constate qu'en général, la valeur de 'm' augment du Nord au Sud le long du littoral et diminue de l'Ouest à l'Est, en liaison avec la continentalité et avec l'augmentation de l'altitude (Fig. **6.A**).

I.3.2.2 Températures maximales

Les valeurs moyennes des températures maximales 'M' sont assez élevées dans la zone étudiée. Elles varient de 25°C dans la zone littorale à jusqu'à 41°C dans les régions internes (Igounane, dans le couloir d'Argana). L'influence maritime joue un rôle très important dans leur adoucissement (Benabid, 1976). Les valeurs de 'M' augmentent avec la continentalité (Sauvage, 1963 ; Fennane, 1982).



(A)



(B)

Figure 6. Cartes des isothermes des températures minimales (A) et des températures maximales (B) en °C, assemblées par l'auteur.

I.4 Synthèse bioclimatique

Après l'analyse de chaque élément climatique, une synthèse bioclimatique est désormais nécessaire pour tirer des conclusions concernant le caractère bioclimatique des points relevés échantillonnés. Elle a été réalisée en nous servant de coefficients et d'indices, habituellement les plus utilisés en climat méditerranéen dont le Centre-Ouest marocain appartient fait bien partie.

I.4.1 Amplitude thermique

Pour mettre en évidence l'effet de la continentalité sur les températures maximales et minimales, l'amplitude thermique basée sur les valeurs extrêmes ($M-m$) a été calculée (Fig. 7). Elle varie parallèlement à l'évaporation. Les résultats ont permis la détermination de trois (3) types de climat dans la zone d'étude en adoptant le système de Debrach (1953) :

- 1. Climat littoral ($15^{\circ}\text{C} < M-m < 25^{\circ}\text{C}$) :** Ce climat englobe les points relevés du littoral des provinces de Safi, Agadir et localement à Essaouira avec quelques points relevés de la province de Tiznit, proches de l'océan ;
- 2. Climat semi-continental ($25^{\circ}\text{C} < M-m < 35^{\circ}\text{C}$) :** C'est le climat le plus représenté dans la zone d'étude. Il regroupe les points continentaux de la région d'Essaouira, Ida Outanane et les points continentaux de Tiznit ;
- 3. Climat continental ($M-m > 35^{\circ}\text{C}$) :** Ce type de climat est individualisé dans des stations d'altitudes et les plus continentales de la province de Taroudant et quelques points d'Ida Outanane et Tiznit (Taфраout) dont les valeurs sont $35,81^{\circ}\text{C}$, $39,37^{\circ}\text{C}$ et $36,7^{\circ}\text{C}$ respectivement.

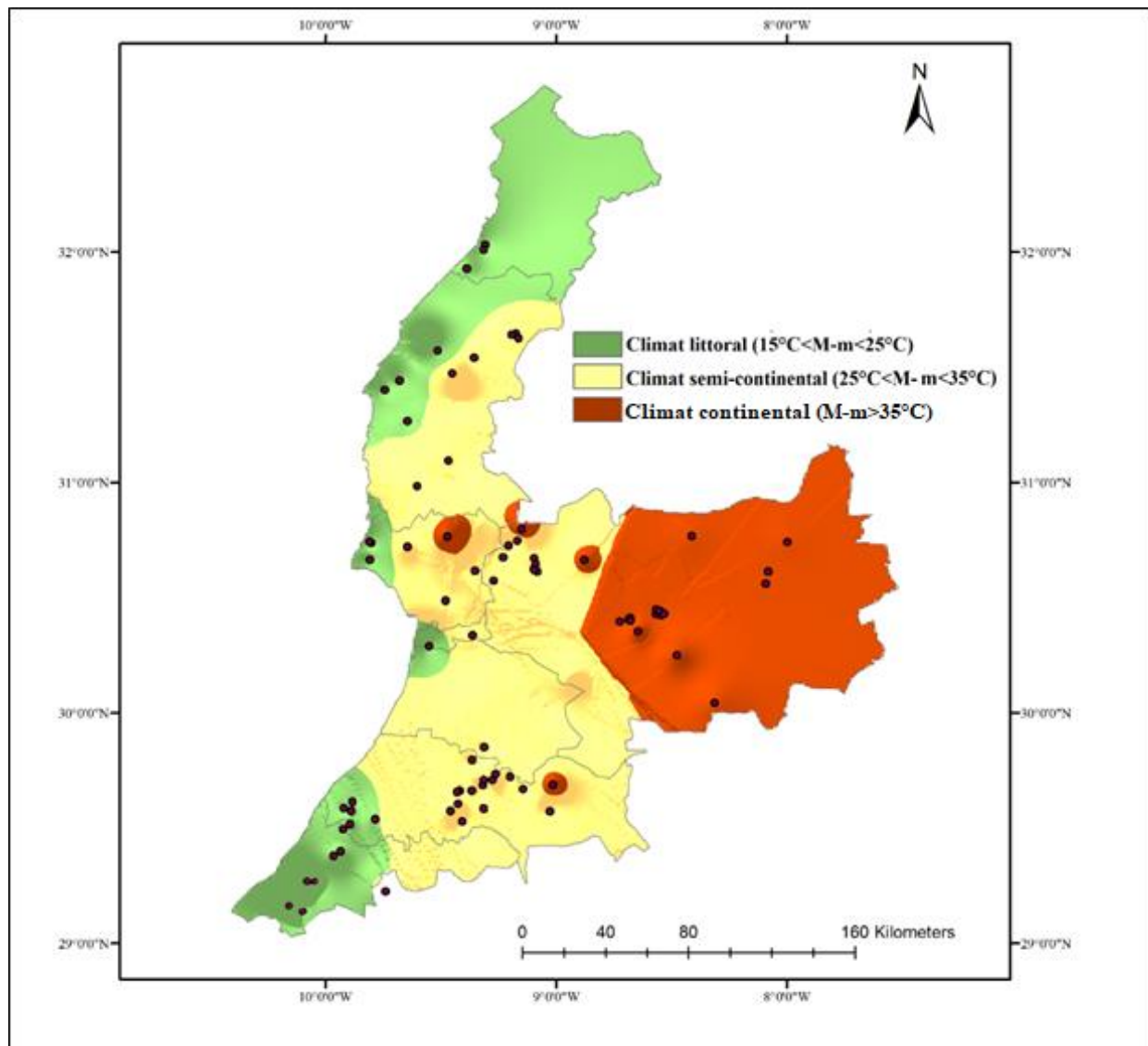


Figure 7. Amplitude thermique et types de climat des points relevés dans l'aire de l'arganier

I.4.2 Quotient pluviothermique et bioclimats

Le Quotient pluviothermique d'Emberger (Q_2), comme son nom l'indique, est une combinaison des facteurs hydriques et thermiques en utilisant la formule simplifiée suivante :

$$Q_2 = \frac{1000 Pa}{\frac{(M + m)}{2} \times (M - m)} = \frac{2000 Pa}{M^2 - m^2}$$

Pa : Précipitations moyennes annuelles (en mm) ;

m : moyenne des minima du mois le plus froid (en °K) ;

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud en (°K).

Le climagramme est une présentation graphique des points relevés permettant de déterminer leur bioclimat en fonction des valeurs du Q_2 et de la température minimale du mois le plus froid (m) (Fig. 8).

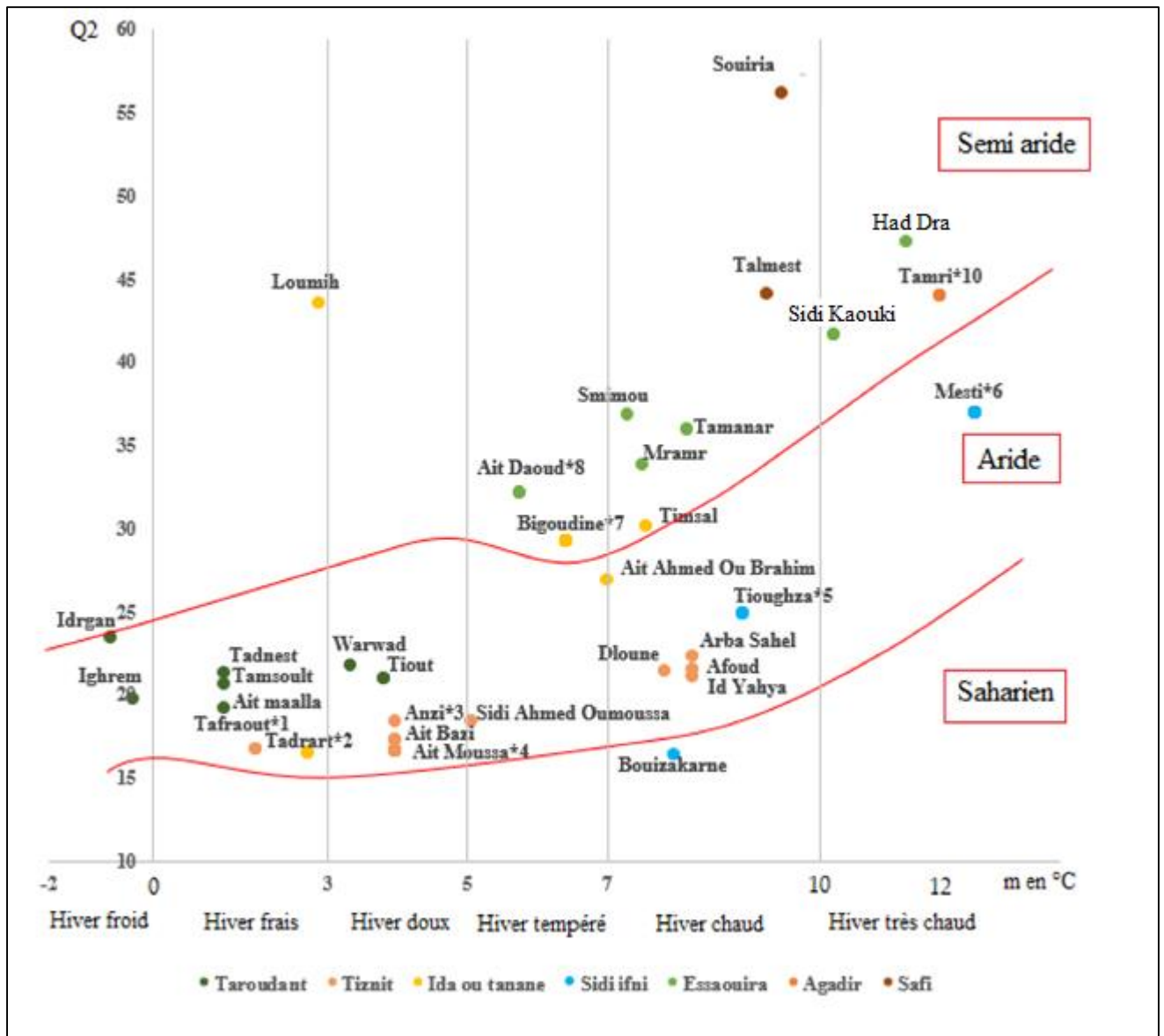


Figure 8. Climagramme des principaux points relevés dans l'aire de l'arganier répartis selon leur provinces et région.

Les points relevés étudiés sont répartis selon leur bioclimat et distingués par leurs variantes thermiques :

Le bioclimat **saharien** est représenté par l'unique point relevé, celui de Bouizakarne dans la province de Guelmim, limitrophe de Sidi Ifni, dans la variante chaude.

Le bioclimat **aride** est le plus répandu dans la zone d'étude. Il présente les variantes :

- à hiver froid : il est observé dans les localités d'Idrgan et Ighrem, situées au sud de Taroudant. Elles se distinguent par leur situation altitudinale élevée leur continentalité,
- à hiver frais : il est constaté dans les points relevés d'Igounane et Tadrart du couloir d'Argana attaché à Ida Outanane dans les localités d'Ait Maalla, Tadnest, Tamsoult, Taфраout et Adai cantonnées dans l'Anti Atlas, au Sud de Tiznite,
- à hiver doux : il est encarté à Warwad, Tiout et Lakhmis N'Arazane de la province de Taroudant et dans plusieurs localités semi continentales de la province de Tiznit (Ait Yassine, Amerken, Tarsouat, Tirhmi, Anzi, Douaate, Tizgui Emassine, Ait Issafen, Douzrou, Idrassan, Id Aatman, Ait Moussa, Imi Ougni, Ait Bazi et Sidi Ahmed Oumoussa),
- à hiver chaud : très marqué dans la province de Tiznit dans les contrées littorales à semi continentale au niveau de Dloune, Id Yahya, Afoud et Arba Sahel placées à Tiznit et à Tioughza, El Had N'Befourna, Tagadirte de Sidi ifni
- à hiver très chaud : il est manifesté à Mesti, Sbouya, Taourirte et Dfilia faisant partie des localités méridionales littorales à semi continentale de la province de Sidi ifni.

Le bioclimat **semi-aride** est plus localisé dans la zone d'étude. Il présente les variantes

- à hiver frais : il intéresse la localité d'altitude de Loumih, au bout de la plaine de Souss, attachée à Ida Outanane
- à hiver tempéré : il est individualisé dans les localités à climat à tendance semi continentale d'Ida Outanane au niveau de Lamnizla, Ait Hassain, Bigoudine, Amalou, Tassademt, Bouzmour, Agadir Imouzgaoun et Ait Ahmed Ou Brahim et à Essaouira au niveau d'Ait Daoud, Ait said et Smimou,
- à hiver chaud : il est implanté dans les localités à climat littoral à semi continental d'Essaouira à Tamanar, Mejji, Mramr, Bouzama et Sidi Kaouki et de Safi à Souiria Laqdim et Talmest
- à hiver très chaud : il est individualisé sur la zone littorale méridionale de la province d'Agadir à Tamri et Imsouan

I.4.3 Diagrammes ombrothermiques

L'analyse des diagrammes (Fig. 9) montre clairement que la durée de la période sèche est longue à très longue dans la zone étudiée. Elle augmente selon un gradient latitudinal Nord-Sud et longitudinal Ouest-Est. Elle est de 7 mois pour Souiria et Tamanar et de 8 à 12 mois dans la zone méridionale subsaharienne représentée par Mesti et Bouizakarane.

En conclusion, la synthèse bioclimatique montre bien que la zone d'étude s'encarte dans les bioclimats aride et semi-aride avec une période de sécheresse allant de 7 mois à 12 mois.

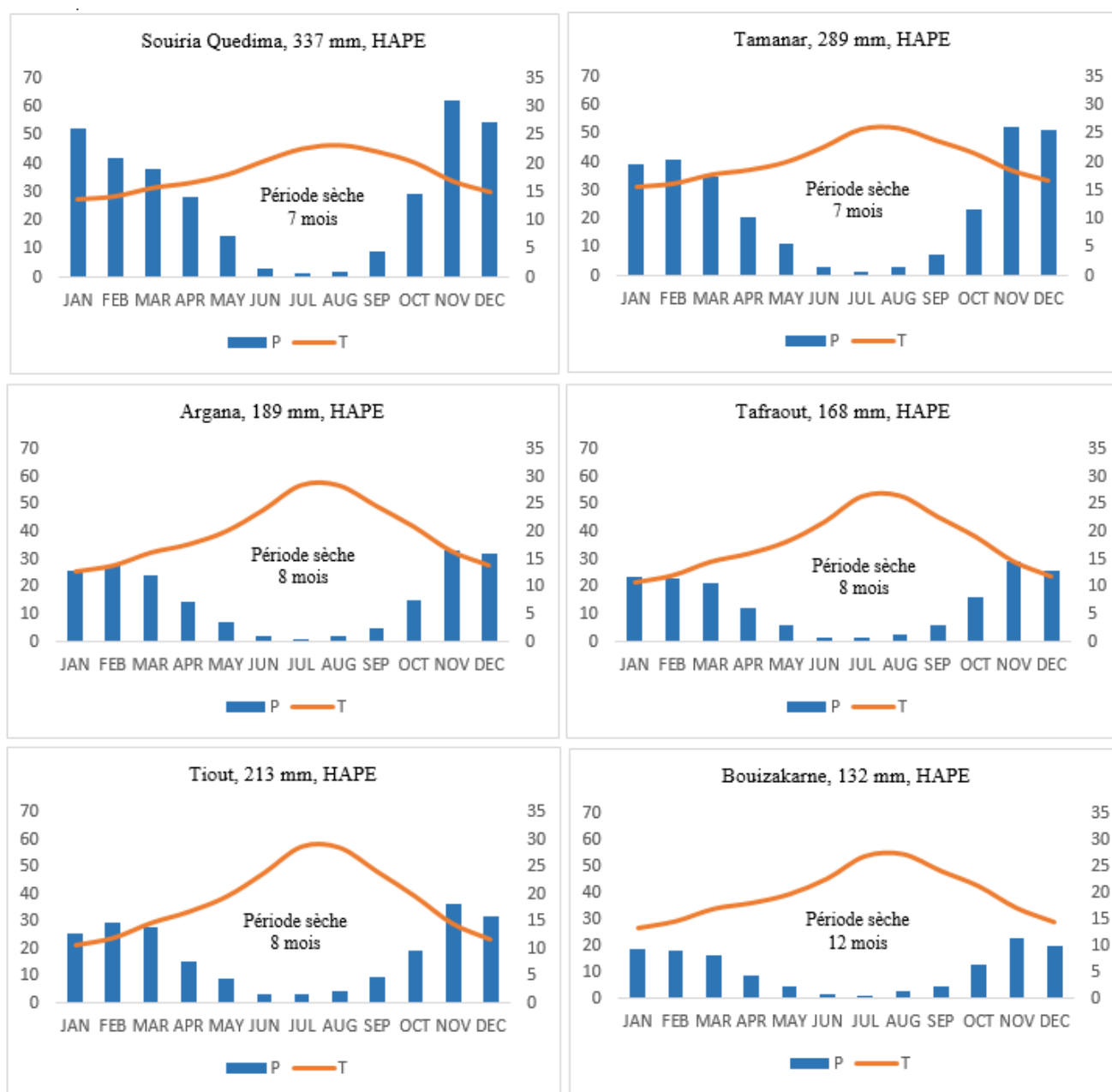


Figure 9. Diagrammes ombrothermiques des principales localités des points relevés du Nord au Sud dans la zone d'étude.

II. Aspects phytogéographiques : Analyse de la flore et de la végétation

L'intérêt d'étudier la flore et la végétation de la zone du Centre-Ouest marocain, dans laquelle domine l'arganeraie, réside dans l'importance de son cortège floristique, riche en plantes patrimoniales et dans la diversité de sa structure végétale.

La présente étude floristique s'intéresse à la flore pérenne de la zone considérée comme un marqueur biologique caractérisant les types d'arganeraie et permettant d'approcher l'état du milieu des 83 points relevés échantillonnés. En effet, le comportement des espèces végétales est fortement lié aux conditions environnementales (orographie, géographie, climat...) permettant par conséquent d'analyser les conditions écologiques de l'arganeraie étudiée et pourrait ainsi approcher les éventuelles indications sur la qualité et la composition chimique de l'huile de l'arganier.

II.1 Zones d'échantillonnage

Les points relevés échantillonnés correspondent aux zones **arganiques** du Centre-Ouest du Maroc dans lesquelles l'arganier constitue l'espèce dominante du fait de sa physionomie et de son abondance. Ces points relevés ont été sélectionnés après une analyse cartographique par *Google Earth* et des cartes disponibles (El Wahidi *et al.*, 2016), en fonction de la densité, de la structure et des paramètres orographiques de l'Arganeraie. La répartition géographique des points relevés et analysés dans cette étude au sein des provinces est présentée dans la figure 10 et Annexe 1 (complément de la Fig. 10).

II.2 Exécution des relevés

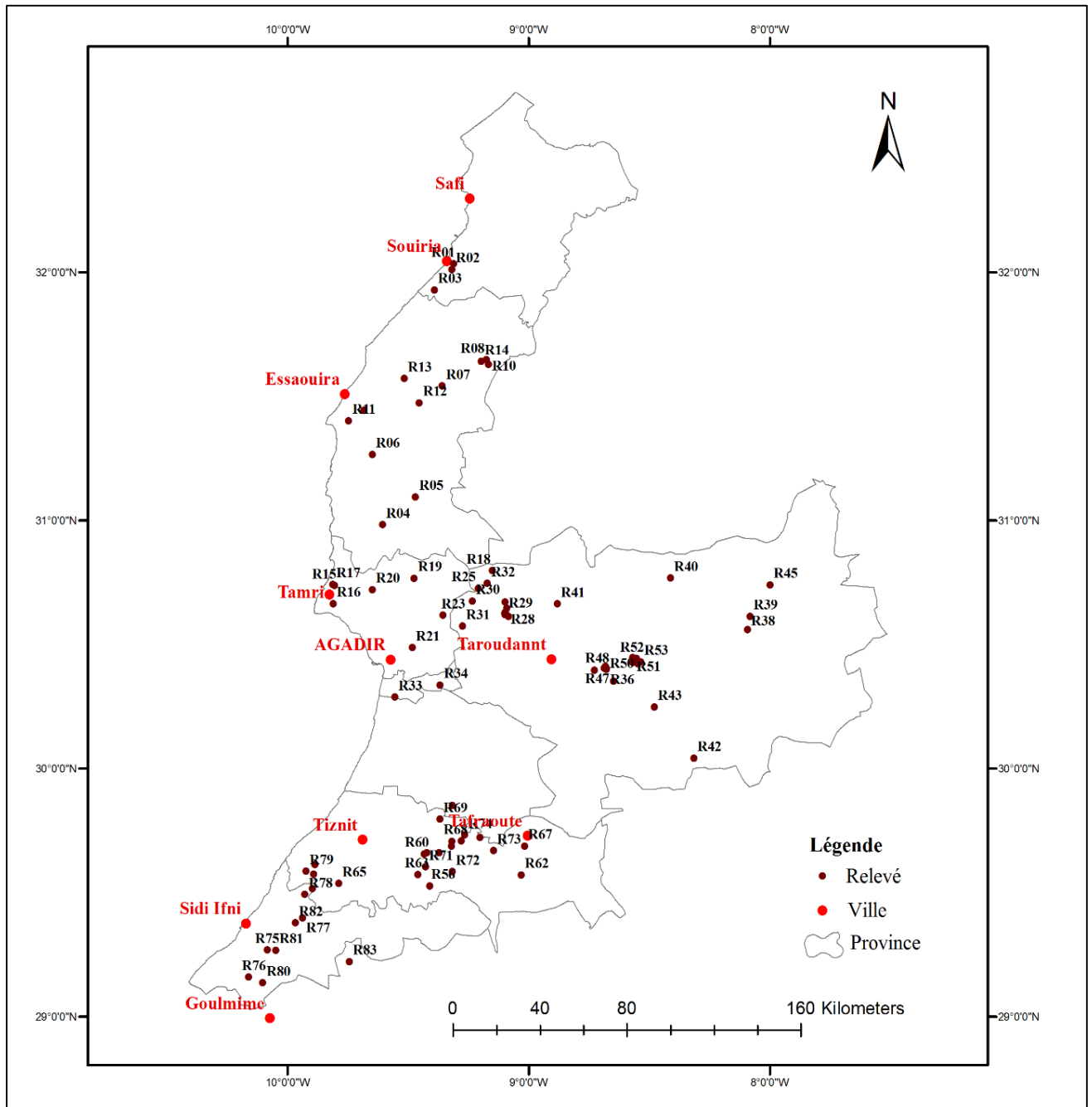


Figure 10. Carte de la localisation des 83 relevés échantillonnés dans les zones arganicoles du Centre-Ouest marocain.

Le relevé est un ensemble d'observation écologique et floristique (Godron, 1971). C'est l'unité de base d'une étude phytocéologique dans laquelle un total de 83 relevés a été effectué durant les missions de terrain en 2017, 2018 et 2019, dans le but d'assembler le maximum d'informations afin d'établir de mettre en évidence les types d'arganeraies et leurs conditions écologiques.

Afin de standardiser le contenu des relevés, une fiche type a été préparée pour cet effet et systématiquement utilisée sur le terrain. Le contenu de ce relevé est inspiré du code établi par Godron *et al.*, (1968) et des travaux de Ouhammou (2005) dans l'objectif est de mettre en évidence toutes les composantes physiques et floristiques d'une manière simple et rapide à saisir sur le terrain. Les relevés ont été réalisés sur une surface homogène équivalente à l'aire minimale de 200 à 400 m² au sens de Guinochet (1973).

II.3 Analyse des variables

Les données à analyser sont composées de deux parties :

II.3.1 Variables topoclimatiques

Ces données ont été regroupées en variables topographiques et du climat. Les variables topographiques servent à approcher le bioclimat et l'étagement de la végétation notamment l'effet de la topographie dont l'altitude, l'exposition et la pente. Les **variables de substrat** renseignent sur la nature de la roche mère.

L'ensemble de données ont été réparties initialement en 59 modalités de variable, réduites par la suite à 36. Elles ont été utilisées ici comme variables descriptives, se rapportent aux variables écologiques, climatiques et bioclimatiques, préalablement définis (§ 1.3. Aspects climatique et bioclimatique).

II.3.2 Données floristiques

Elles correspondent aux **variables floristiques**, constituant l'élément crucial du relevé. Elles contiennent la liste des espèces récoltées dans les différentes arganeraies au sein des localités de chaque province. Les noms des espèces retenus ont été actualisés selon la nomenclature actualisée (APG IV) et ont été classées dans leur famille systématique respective et complétées par les statuts de l'endémisme et des catégories de menaces des catégories de l'UICN (Annexe 2). Pour faciliter leur intégration dans le tableau final à analyser, ces espèces ont été présentées selon leurs fréquences dans l'ensemble des points relevés de chaque province. Elles ont été abrégées en adoptant la règle d'abréviation, en prenant les deux premières lettres du nom du genre et celles de l'espèce ; **par exemple** : Ar.sp pour *Argania spinosa*.

Dans cette étude, 131 espèces de plantes vasculaires réparties en 99 genres et 36 familles. Un ensemble de 17 espèces sont endémiques dont 9 sont marocaines et 4 espèces sont menacées, de catégorie vulnérable, ont été inventoriées (Annexe 2)

Chaque espèce du relevé est affectée par un indice d'abondance-dominance qui exprime l'espace relatif occupé par l'ensemble des individus de cette espèce (Guinochet, 1973). L'abondance et la dominance sont exprimées par l'échelle de **Blanquet (1979)** contenant six indices :

Indices	Abondance	Dominance (Recouvrement : R)
+	Eparse	$R < 1\%$
1	Très rare	$1 < R < 5\%$
2	Rare	$5 < R < 25\%$
3	Peu abondante	$25 < R < 50\%$
4	Abondante	$50 < R < 75\%$
5	Très abondante	$R > 75\%$

II.4 Analyses des données

Deux approches méthodologiques multidimensionnelles ont été successivement entreprises. D'abord une analyse floristique de la matrice comprenant 83 points relevés répartis dans les 7 provinces et région et 131 espèces végétales vasculaires présentées par leur fréquence. Cet ensemble a été ensuite soumis à la classification hiérarchique associée à la carte thermique (heatmap). Elle visait la détermination des espèces caractéristiques des groupements végétaux de chaque contrée et complétés par leur rapprochement aux unités phytosociologiques, en l'occurrence l'ordre, les alliances et les associations végétales, déjà étudiées dans la zone Centro-occidentale du Maroc.

La seconde analyse a concerné une analyse phyto-écologique des groupements végétaux et des modalités des variables altitudinales, climatiques et bioclimatiques présentées en valeurs de leur fréquence à travers la mise en évidence de la correspondance de ces deux éléments.

II.4.1 Analyse floristique

Le concept de la biodiversité, universellement admis par la communauté scientifique et appliqué à la richesse floristique, considère le nombre de taxa présent dans une quelconque unité géographique ou administrative (Ramírez *et al.*, 2016).

A signaler que, du fait de l'originalité de cette biodiversité et des habitats de la zone du Centre-Ouest du Maroc, les études phytosociologiques se sont remarquées par leur abondance et l'individualité de leur importance de caractère biogéographique.

De ce fait, la création de nouvelles unités phytosociologiques considérant l'**ordre** des *Acacio gummiferae-Arganietalia spinosae* Barbéro, Benabid, Quézel, Rivas-Martinez & Santos, 1982, et de ses deux **alliances** en l'occurrence *Acacio gummiferae-Arganietalia spinosae* Barbéro, Benabid, Quézel, Rivas-Martinez & Santos, 1982 et *Senecio- anteuphorbii-Arganion spinosae* Barbéro, Benabid, Quézel, Rivas-Martinez & Santos 1982 et de plusieurs **associations végétales** inédites ailleurs au Maroc, témoignent inéluctablement de leur statut d'unités d'endémiques (Peltier, 1982 ; Barbéro *et al.*, 1982 ; Peltier, 1983 ; Fennane, 2003 ; Taleb & Fennane, 2021...).

D'un point de vue phytosociologique, les différentes formations dominées par l'Arganier, qualifiées de groupements présteppiques ou préforestiers, ont toutes été regroupées dans le nouvel ordre des *Acacio – Arganietalia* (Peltier, 1982 ; Barbéro *et al.*, 1982) qui s'intègre dans la classe des *Quercetea ilicis*.

Tableau 1. Données générales sur les provinces – région à arganiers étudiées

Province / Région	Safi	Essaouira	Agadir	Ida Outanan	Taroudant	Tiznit	Sidi Ifni
Nombre de Relevé	3	11	5	15	19	21	9
Effectif des Localité	3	9	4	13	8	21	7
Latitude minimale	31,9289167	30,983587	30,2883889	30,487736	30,042626	29,517208	29,138017
Latitude maximale	32,0333611	31,647625	30,742249	30,797832	30,768026	29,851609	29,587335
Différence des latitudes	0,1044444	0,664038	0,4538601	0,310096	0,7254	0,334401	0,449318
Longitude minimale	-9,3902778	-9,745036	-9,811218	-9,647065	-8,880922	-9,894989	-10,15958
Longitude maximale	-9,31075	-9,165574	-9,366157779	-9,082323	-7,999391	-9,016112	-9,742921811
Différence des longitudes	0,0795278	0,579462	0,445060221	0,564742	0,881531	0,878877	0,416658189
Altitude minimale	86	66	38	360	427	228	438
Altitude maximale	116	658	464	1361	1326	1099	983
Différence d'altitude	30	592	426	1001	899	871	545
Moyenne des altitudes	93	372	196	729,2	732	575	438
Effectif d'espèces	34	53	30	52	59	46	15
Effectif de genres	32	44	26	43	50	39	11
Effectif de familles	17	25	16	23	22	18	8
Endémiques du Maroc	<i>Thymus broussonetii</i>	<i>Kleinia anteuphorbium</i>	<i>Kleinia anteuphorbium</i>	<i>Lavandula maroccana</i>	<i>Euphorbia officinarum</i> subsp. <i>officinarum</i>	<i>Kleinia anteuphorbium</i>	<i>Kleinia anteuphorbium</i>
		<i>Thymus broussonetii</i>	<i>Acacia gummifera</i>	<i>Micromeria macrosiphon</i>	<i>Lavandula mairei</i>	<i>Euphorbia officinarum</i> subsp. <i>officinarum</i>	<i>Euphorbia officinarum</i> subsp. <i>officinarum</i>
		<i>Acacia gummifera</i>		<i>Olea europaea</i> subsp. <i>maroccana</i>	<i>Thymus maroccanus</i>	<i>Thymus maroccanus</i>	<i>Lavandula mairei</i>
					<i>Acacia gummifera</i>	<i>Acacia gummifera</i>	
					<i>Plantago lanceolata</i>		
Endémiques larges	<i>Linaria incarnata</i>	<i>Argania spinosa</i>	<i>Helianthemum canariense</i>	<i>Cleome violacea</i>	<i>Euphorbia officinarum</i> subsp. <i>echinus</i>	<i>Euphorbia officinarum</i> subsp. <i>echinus</i>	<i>Euphorbia officinarum</i> subsp. <i>echinus</i>
	<i>Argania spinosa</i>		<i>Euphorbia regis-jubae</i>	<i>Argania spinosa</i>	<i>Erodium meynieri</i>	<i>Euphorbia regis-jubae</i>	<i>Euphorbia regis-jubae</i>
			<i>Argania spinosa</i>		<i>Argania spinosa</i>	<i>Erodium meynieri</i>	<i>Argania spinosa</i>
					<i>Withania adpressa</i>	<i>Argania spinosa</i>	
						<i>Withania adpressa</i>	
Menacées (vulnérables)	<i>Euphorbia officinarum</i> subsp. <i>officinarum</i>	<i>Thymus broussonetii</i>	<i>Helianthemum canariense</i>	<i>Micromeria macrosiphon</i>	<i>Euphorbia officinarum</i> subsp. <i>officinarum</i>	<i>Euphorbia officinarum</i> subsp. <i>officinarum</i>	<i>Euphorbia officinarum</i>

II.4.1.1 Individualisation des espèces caractéristiques des groupements végétaux

La technique employée est la classification hiérarchique combinée à une carte thermique (heatmap). Ses résultats ont permis de déterminer les espèces caractéristiques des types des arganeraies étudiées (Fig. 11).

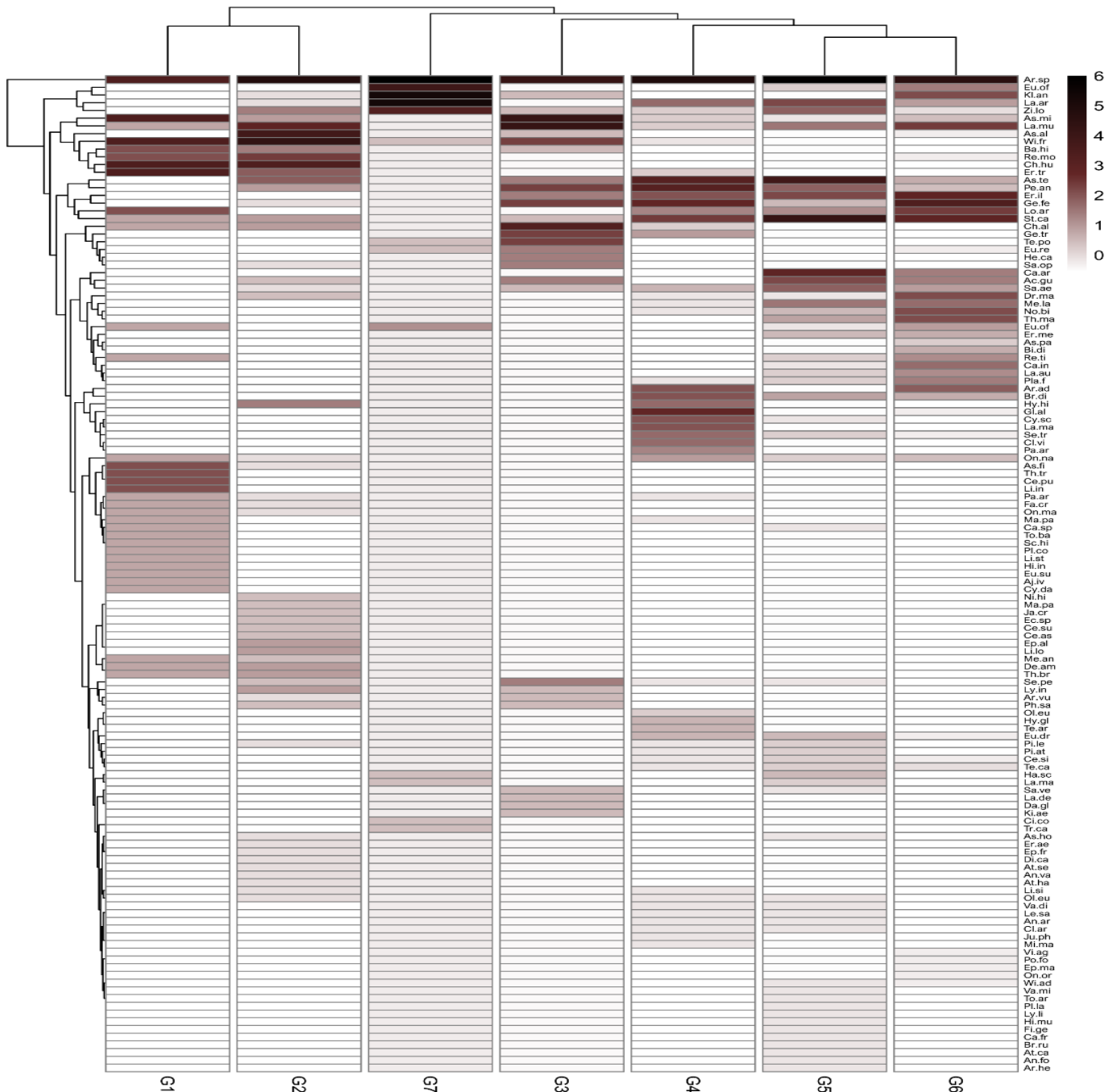


Figure 11. Classification hiérarchique combinée à la carte thermique des distances euclidiennes à partir des fréquences de la composition floristique de chaque province et région (G1 : Safi, G2 : Essaouira, G3 : Agadir, G4 : Agadir Ida-Outanane, G5 : Taroudant, G6 : Tiznit et G7 : Sidi Ifni).

- **Groupe G1 de Safi : Arganeraie à *Chamaerops humilis* L., *Withania frutescens* (L.) Pauquy., *Ballota hirsute* Benth., *Retama monosperma* (L.) Boiss., *Chamaecytisus albidus* (DC.) Rothm.**

Il correspond à l'arganeraie la plus septentrionale parmi les arganeraies étudiées, individualisée dans la région de Souiria, au sud de Safi. Il s'agit d'une arganeraie limite à physionomie préforestière assez ouverte. La strate buissonnante est la plus dominante.

Sur le plan phytosociologique, il se rattache à l'ordre des *Acacio gummiferae-Arganietalia spinosae* Barbéro, Benabid, Quézel, Rivas-Martinez & Santos, 1982. Il n'est pas facile de l'approcher à aucune des associations végétales étudiées au Maroc.

- **Groupe G2 d'Essaouira : Arganeraie à *Asparagus albus* L., *Lavandula multifida* L., *Ephedra altissima* Desf., *Lycium intricatum* Boiss. , *Thymus broussonetii* Boiss.**

Cette arganeraie est individualisée ici par ses espèces les fréquentes dans les 11 points relevés répartis dans la province d'Essaouira. La densité des espèces de la strate buissonnante le rend impénétrable. Il s'agit d'un matorral, assez dense et perturbé par les activités pastorales dont il est exposé. La présence du thym de Broussonet, espèce endémique du Maroc, attire la convoitise des collecteurs des plantes médicinales.

Sur le plan phytosociologique, la composition de sa flore le rattache à l'ordre des *Acacio gummiferae-Arganietalia spinosae* Barbéro, Benabid, Quézel, Rivas-Martinez & Santos, 1982 et à l'Alliance *Acacion gummiferae* Barbero, Benabid, Quézel, Rivas-Martinez & Santos 1982.

- **Groupe G3 d'Agadir: Arganeraie à *Genista ferox* Poir., *Genista tricuspidata* Desf., *Helianthemum canariense* (Jacq.) Pers., *Searsia pentaphylla* (Jacq.) F.A.Barkley,**

Ce groupement a été défini par 5 relevés contenant une trentaine d'espèces. Il représente la zone littorale de la province d'Agadir. C'est un matorral assez dense. Il est caractérisé les deux *Genista ferox* et *tricuspidata*, *Helianthemum canariense*, espèce endémique macaronésienne à statut d'espèce vulnérable (Fennane, 2018), *Salsola oppositifolia*, *Lavandula dentata* et *Searsia pentaphylla*. Peltier (1982) a mentionné la sous association à *Searsia pentaphylla* au nord d'Agadir.

La présence de *Euphorbia regis-jubae* J.Gay ou euphorbe du roi Juba, la fait attacher à l'ordre des *Acacio gummiferae-Arganietalia spinosae* Barbéro, Benabid, Quézel, Rivas-Martinez & Santos, 1982 mais à l'Alliance *Senecio- anteuphorbii-Arganion spinosae* Barbéro, Benabid, Quézel, Rivas-Martinez & Santos 1982.

- **Groupe G4 de la région d'Ida Outanane : Arganeraie à *Periploca angustifolia* Labill., *Globularia alypum* L., *Olea europaea* subsp. *maroccana* (Greuter & Burdet) P.Vargas & al., *Ceratonia siliqua* L.**

Une quinzaine de relevés a permis la description des arganeraies d'Ida-Outanane. Cette région présente un cortège floristique typique riche en espèces endémiques dont *Olea europaea* subsp. *maroccana*, *Lavandula maroccana*. Cette arganeraie correspond à l'association végétale *Oleo salicifoliae* – *Arganietum spinosae* qui appartient à l'Alliance de l'Acacion *gummiferae* Barbéro, Benabid, Quézel, Rivas-Martinez & Santos 1982. Elle s'approche de l'association *Periploca laevigatae-Arganietum spinosae*, définie par Peltier & Msanda (1995) et fait la transition avec la *Tetraclinaie* à arganier de l'association *Tetraclino articulatae-Arganietum spinosae* définie par Fennane (1988).

- **Groupe G5 de Taroudant : Arganeraie à *Acacia gummifera* Willd., *Launaea arborescens* (Batt.) Murb., *Salvia aegyptiaca* L., *Ziziphus lotus* (L.) Lam., *Pistacia atlantica* Desf.**

Ce groupement d'arganier à acacia, jujubier et pistachier de l'Atlas est défini par 19 relevés répartis dans les zones échantillonnées de la province de Taroudant essentiellement dans les régions de Tiout et Ighrem au Sud, dans la zone continentale d'Aoulouz à l'Est, Aouzioua au Nord et Oulad Berhil au Nord-Est. Il s'agit d'une formation mixte d'arganier et d'acacia (Taleb & Fennane, 2019) et faisant partie de l'Alliance du- *Senecio- anteuphorbii-Arganion spinosae* Barbéro, Benabid, Quézel, Rivas-Martinez & Santos 1982.

- **Groupe G6 de Tiznit : Arganeraie à *Launaea arborescens* (Batt.) Murb., *Thymus maroccanus* Ball, *Haloxylon scoparium* Pomel**

Ce groupement est étudié par 21 relevés contenant 39 espèces répartis dans les localités de la province de Tiznit. La présence d'*Acacia gummifera* Willd. et des deux euphorbes, oursin et de Beaumier est en accord avec sa position intermédiaire entre les groupements 5 (Taroudant) et 6 (Sidi Ifni). Il correspond à un groupement xérophile. Il s'approche de

l'association d'*Arganio spinosae*-*Haloxyletum scopariae* définie par Peltier (1982) dans la basse plaine du Souss, le long de la route Tiznit-Agadir (Taleb et Fennane (2021).

- **Groupe G7 de Sidi Ifni : Arganeraie à *Kleinia anteuphorbium* (L.) Haw., *Euphorbia officinarum* subsp. *officinarum* L., *Euphorbia officinarum* subsp. *echinus* (Hook.f. & Coss.) Vindt, *Euphorbia regis-jubae* J.Gay**

Ce groupement est représenté par 11 espèces et 9 relevés dont un a été réalisé à **Bouizakarne dans la province de Guelmim**, limitrophe de la province de Sidi Ifni. Il correspond à l'arganeraie la plus méridionale de notre zone d'étude. Il s'agit d'une formation assez dense dans laquelle le seneçon et les trois euphorbes caractérisent la physionomie de steppe à «euphorbe oursin» qui couvre ici la bande côtière qui englobe le sud du Souss et une partie du Sahara atlantique marocain, marquée par la présence simultanée d'espèces de souches tropicale, saharienne et méditerranéenne (Peltier & Msanda, 1995). C'est dans le massif d'Ifni que la formation est la plus originale avec la présence de l'euphorbe du Roi Juba. Nulle part ailleurs au Maroc, *Euphorbia* ssp. *regis-jubae* n'atteint une telle étendue et une telle densité donnant au paysage un cachet tropical indéniable (Msanda *et al.*, 2005).

Cette arganeraie, sur le plan phytosociologique, se rattache à l'Alliance du- *Senecio-anteuphorbii*-*Arganion spinosae* Barbéro, Benabid, Quézel, Rivas-Martinez & Santos 1982 et à l'Association végétale de *Euphorbio echini*-*Arganietum spinosae* Barbéro, Benabid, Quézel, Rivas-Martinez & Santos 1982 et *Euphorbio beaumieranae*-*Arganietum spinosae* Barbéro, Benabid, Quézel, Rivas- Martinez & Santos 1982 qui est un équivalent de *Arganio-Euphorbietum beaumieranae* Peltier 1982.

II.4.2 Analyse phyto-écologique

La deuxième approche multidimensionnelle utilisée dans cette étude concerne l'Analyse Factorielle des Composantes (AFC) en liaison avec les données qualitatives utilisées. Elle permet de dégager les liaisons, les dépendances et les correspondances existantes entre les variables de la matrice des données. Elle admet la représentation simultanée qui permet de visualiser les proximités entre un profil ligne par rapport à tous les profils colonnes et entre un profil colonne par rapport à tous les profils lignes (Messad, 2008).

A cet effet, nous avons préparé un tableau qui met en jeu les 7 provinces - région et leurs groupements végétaux en lignes et les 36 modalités des variables, se rapportant à l'altitude, aux climats et bioclimats, exprimées en fréquence relative en colonnes.

II.4.2.1 Tableau des valeurs propres

Le tableau ci-dessous donne les valeurs propres et les taux d'inertie pour les six premiers axes factoriels obtenus par cette analyse.

Axes	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5	Axe 6
Variance = Valeur propre	0,613	0,345	0,275	0,172	0,141	0,055
Inertie = mesure de liaison des deux variables (%)	38,33	21,536	17,164	10,751	8,81	3,408
Inertie cumulée	38,33	59,86	77,03	87,78	96,59	100

Les valeurs propres, correspondant à l'inertie du nuage de points le long de chaque axe, sont relativement élevées. Elles renseignent sur une structure en partition en blocs (Darvin, 1990). La première valeur propre vaut 0,613 et représente 38,33 % de la valeur totale ou inertie. Le plans factoriel formé par les deux premiers axes représente 59,86 % de l'inertie totale du tableau analysé mais avec une prédominance de l'axe 1 et l'existence de l'effet Guttman qui reste à déterminer (Fig. 12).

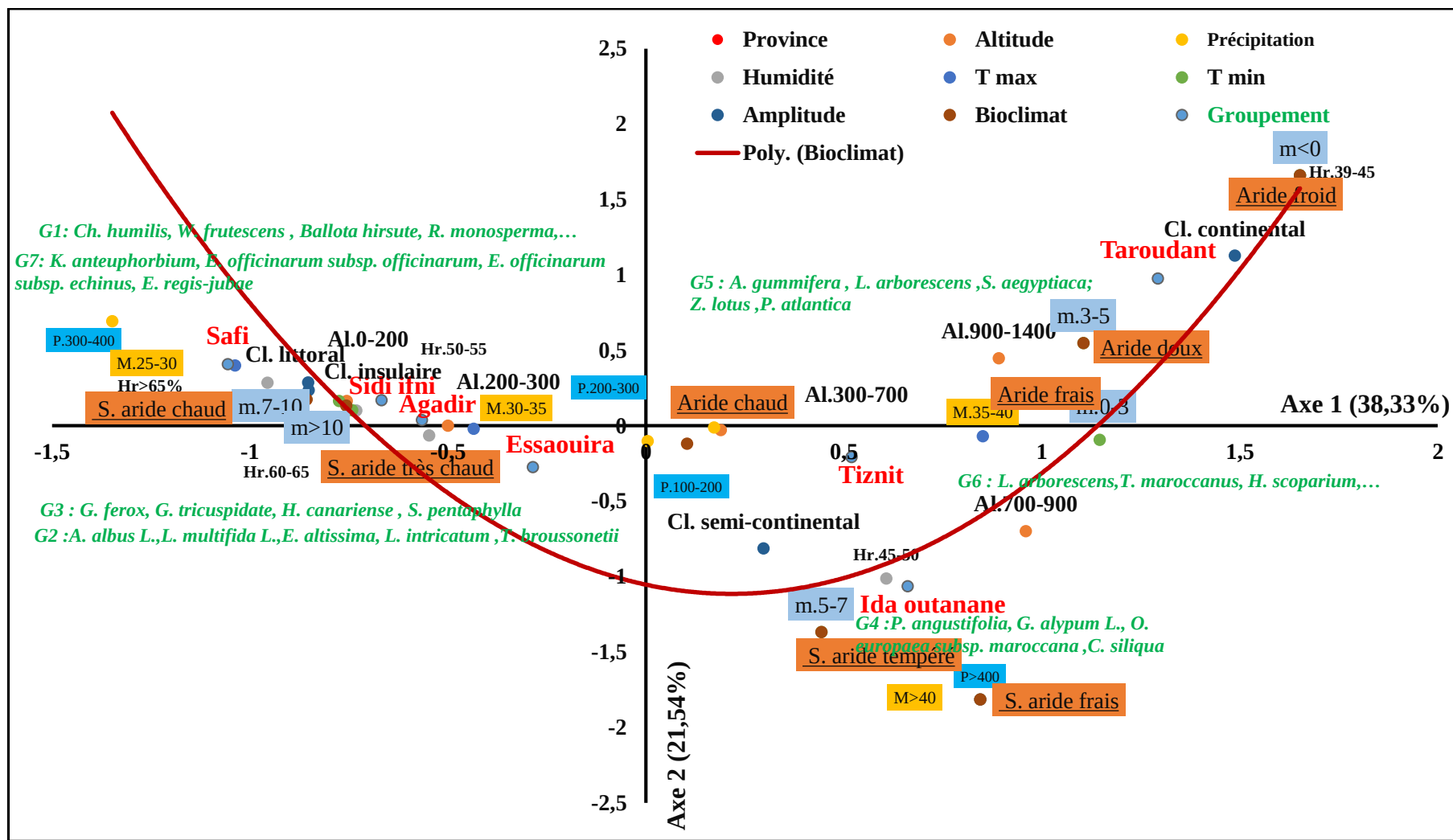


Figure 12. Ordination des provinces - région et des groupements végétaux des arganeraies en fonction des modalités physiques, climatiques et bioclimatiques. Plan factoriel 1-2 de l'Analyse Factorielle des Composantes.

II.4.2.2 Interprétation des axes factoriels

Cette interprétation est basée sur les valeurs de la contribution des provinces – région et les modalités des variables retenues dans la construction d'un axe. Les modalités ayant une contribution supérieure à la moyenne ont été les seules prises en considération et sur lesquelles s'était appuyée l'interprétation et en tenant compte de l'ordre décroissant des modalités (Messad, 2008).

➤ **Axe factoriel 1 :**

Participent à l'élaboration de cet axe, les provinces – région et les modalités des variables, classées selon les valeurs de leur contribution décroissante :

Axe 1 (négatif)				Axe 1 (positif)			
Ordre	Provinces	Ordre	Modalités	Ordre	Provinces	Ordre	Modalités
2	Safi	8	Semi-aride chaud	1	Taroudant	5	Hr.39-45%
3	Sidi ifni	10	Climat littoral	4	Ida Outanane	6	Cl. continental
7	Agadir	14	m.7-10°C	11	Tiznit	9	M.35-40°C
		15	Hr>65%			12	m.3-5°C
						13	Aride doux

- **Du côté négatif**

Se placent les provinces littorales, Safi, Sidi Ifni et Agadir, selon l'ordre de leur contribution de cet axe et auxquelles s'associent les modalités de bioclimat semi-aride variante chaude avec le 'm' compris entre 7°C et 10°C et un climat littoral à humidité relative de l'air supérieure à 65%.

- **Du côté positif**

Existents les provinces–région continentales, Taroudant, Ida Outanane et Tiznit, déterminées par les modalités des variables d'humidité relative de l'air comprise entre 39% et 45 %, de climat continental à températures maximales supérieure à 35°C et par le bioclimat aride doux à variante comprise entre 3°C et 5°C.

À la suite de cette disposition, l'axe factoriel 1 est prépondérant. Il correspondrait à la continentalité qui oppose clairement les zones littorales des zones continentales.

➤ **Axe factoriel 2 :**

Participent à l'élaboration de cet axe, les provinces – région et les modalités des variables, classées selon les valeurs de leur contribution décroissante :

Axe 2 (négatif)				Axe 2 (positif)			
Ordre	Provinces	Ordre	Modalités	Ordre	Provinces	Ordre	Modalités
1	Ida Outanane	4	m.5-7°C	2	Taroudant	3	Hr.39-45%
12	Essaouira	5	S. aride	9	Safi	8	Cl. continental
		6	tempéré			10	m<0°C
		7	Hr.45-50%			11	Aride froid
			Cl. semi-continental				

- **Du côté négatif**

Se trouvent les provinces – région d'Ida Outanane et Essaouira accompagnées de bioclimat semi-aride à variante tempérée à 'm' compris entre 5°C et 7°C, d'humidité relative de l'air variant de 45% à 50% et de climat semi continental.

A noter que cette extrême situation apparaît plus convenable pour Ida Outanane qu'à Essaouira.

- **Du côté positif**

Se positionnent les provinces de Taroudant et Safi en liaison avec le Climat continental à humidité relative variant de 39% à 45% et du bioclimat aride à variante froide à 'm' inférieur à 0°C. A noter que cette extrême situation apparaît plus convenable pour Taroudant qu'à Safi.

Cet axe 2 manifeste une double signification, les variations des bioclimats et d'humidité relative de l'air.

II.5 Déterminisme écologique des groupements végétaux

Dans la partie de l'analyse floristique (§ 2.4.1.), la classification hiérarchique (CH) associée à la carte thermique ou heatmap a permis de renseigner les espèces caractéristiques des groupements végétaux de chacune des 7 provinces – région arganiques échantillonnées. Cette analyse a aussi été complétée par le rapprochement de ces groupements à travers l'étude des unités phytosociologiques qui leur étaient attachées.

Dans la partie de l'analyse phyto-écologique (§ 2.4.2), l'utilisation de l'AFC a abouti à approcher les conditions physiographiques, climatiques et bioclimatiques des groupements végétaux individualisés dans les 7 provinces et région étudiées (Fig. 13).

Dans un esprit de synthèse globale, l'analyse des conditions écologiques, basées essentiellement sur l'altitude, les grands traits du climat et les types de bioclimats a porté sur les types de climat littoral, mixte littoral à semi-continental, semi continental et continental individualisés dans cette étude.

1. Climat littoral

Elle est représentée par les points relevés réalisés dans les Provinces **Safi** et **Agadir**. Altitudinalement, ils occupent les plaines ne dépassant pas 200m. Sur le plan écologique, les précipitations varient de 200mm à 400mm et à humidité relative de l'air arrivant à 65%. Les températures maximales intéressent les tranches 25°C - 30°C et 30°C -35°C, les températures

minimales comprennent les variantes chaudes (7°C-10°C) à très chaudes ($m > 10^{\circ}\text{C}$). Le bioclimat induit se rapporte au semi-aride chaud à très chaud.

Au point de vue floristique, cette zone est caractérisée, dans la strate arbustive, par *Searsia pentaphylla*, *Withania frutescens*, et par *Retama monosperma*. La strate des buissons ou ligneux bas est représentée par *Chamaerops humilis*, *Chamaecytisus albidus*, *Ballota hirsuta*.

2. Climat mixte littoral à semi-continentale

La région en question ici englobe les points relevés faisant partie des provenances d'**Essaouira** et de **Sidi Ifni**. Altitudinalement, ils s'individualisent essentiellement dans la tranche 300 m à 700 m mais l'altitude des points relevés de **Sidi Ifni** est plus basse, variant de 0m - à 300 m. A **Essaouira**, les précipitations sont plus élevées, de l'ordre de 200-300 mm, mais plus faibles à **Sidi Ifni** marquée par la tranche 100 mm à 200 mm et l'humidité relative de l'air variant de 50% à plus de 65% à **Sidi Ifni** et de 60% à 65% à **Essaouira**, sous l'effet de l'océanité élevée, surtout dans la zone littorale. Les températures maximales couvrent la tranche 25°C à 35°C à **Sidi Ifni** et 30°C à 35°C à **Essaouira**, quant aux températures minimales, elles intéressent les tranches 7°C-10°C et supérieure à 10°C, dans les deux provinces. Pour les bioclimats, **Sidi Ifni** occupe l'aride chaud et le semi-aride chaud à très chaud, alors qu'à **Essaouira**, le bioclimat est de type semi-aride tempéré, chaud à très chaud, en liaison avec sa situation plus septentrionale par rapport à Sidi Ifni.

Pour les types de formation végétale, il s'agit d'une arganeraie dominée, à **Essaouira**, par la strate buissonnante représentée par *Asparagus albus* L., *Lavandula multifida* L. et *Thymus broussonetii*, d'un nanophanérophyte, *Lycium intricatum* et d'une liane, *Ephedra altissima*. Quant à **Sidi Ifni**, la dominance d'espèces d'Euphorbes cactoides est remarquable, représentées par des espèces macaronésiennes, cas de *Kleinia anteuphorbium*, et d'espèces saharo-occidentales atlantiques dont *Euphorbia officinarum* subsp. *officinarum*, *Euphorbia officinarum* subsp. *echinus* et *Euphorbia regis-jubae*.

3. Climat à dominance semi-continentale

Sont inclus dans ce type de bioclimat, les points relevés répartis dans la région d'**Ida Outanane** au Nord-Est de la zone Centro-occidentale et la province de **Tiznit** au Sud de cette zone. Les altitudes les plus fréquentes sont observées dans la tranche 700 m -1400 m, en relation avec les hauts reliefs du Haut Atlas Occidental et dans la tranche 300 m -900 m à **Tiznit**. Pour les précipitations, la tranche 100 mm – 200 mm est quasi dominante à **Tiznit** ; mais à **Ida Outanane**, elles se concentrent essentiellement dans la tranche 200 mm – 300 mm,

avec des points dans la tranche 100 mm – 200 mm, voire même supérieures à 400mm. Le taux de l'humidité relative de l'air est prévalu dans l'intervalle 45% - 50% ; au niveau de ces deux provinces. Au sujet de l'élément climatique thermique, la température maximale intéresse essentiellement la tranche 35°C – 40°C dans les deux provenances et la température minimale, la tranche 3°C - 5°C à **Tiznit** et 5°C - 7°C à **Ida Outanane**. Le bioclimat est de type aride doux essentiellement à **Tiznit** et de type aride frais à tempéré et semi-aride frais à tempéré à **Ida Outanane**.

Au point de vue de la végétation, il s'agit d'une arganeraie marquée par des espèces xérophiles, cas de *Launaea arborescens*, *Haloxylon scoparium* et *Withania adpressa* à **Tiznit**. Cette espèce d'origine saharienne arrive ici à son latitude optimale. À **Ida Outanane** se présente une arganeraie plus ou moins méxo-thermophile représentée par l'olivier marocain, *Olea europaea* subsp. *maroccana*, *Ceratonia siliqua*, la liane *Periploca angustifolia* et *Globularia alypum*, espèce héliophile des clairières.

4. Climat continental

Le climat continental est représenté par les points relevés réalisés dans la province de **Taradount**. Au point de vue altitudinale, ces points s'étalent de 300 m à 1400 m. Les précipitations sont concentrées dans la tranche 200 m à 300m. L'humidité relative de l'air enregistre un faible taux 39% à 45%. Les températures maximales couvrant la tranche 35°C et 40°C et minimales allant des températures négatives ($m < 0^{\circ}\text{C}$), et des variantes fraîche (0°C à 3°C) et douces (3°C à 5°C). Les bioclimats étudiés dans cette zone s'encartent dans l'Aride froid, frais et doux.

Les espèces caractéristiques relevées dans cette province à *Acacia gummifera*, *Launaea arborescens*, *Salvia aegyptiaca*, *Ziziphus lotus* et *Pistacia atlantica*, représentant un cortège de plantes xérophiles.

III. Conclusions

La zone du Centre Ouest du Maroc recèle d'éléments naturels présentant des conditions locales de types physiographique, climatique, bioclimatique, floristique et végétal spéciaux. Si la flore, dont l'**Arganier** en est la clé de voûte, montre une diversité quantitative et qualitative par sa richesse, ses origines et ses statuts d'endémisme, de rareté et de menace, la végétation, représentée par l'**Arganeraie**, qui intègre bien ces conditions locales, est aussi remarquable par ses services écosystémiques, sa structure et sa diversité. Ces caractéristiques naturelles exceptionnelles, échantillonnées dans l'aire arganicole, appuient bien la très apparente originalité multidimensionnelle de la zone Centro-occidentale marocaine.

Concernant les modalités des variables retenues, l'altitude des différents groupements végétaux s'étale du niveau de la mer jusque 1400 m, mais se concentre dans la tranche 300 – 700 m. Pour le climat, l'optimum des précipitations se situe entre 200 et 300 mm et exceptionnellement 300 – 400 mm en situation climatique littorale ou semi continentale en altitude. Le taux de l'humidité relative de l'air joue un rôle crucial dans la zone d'étude. Son effet est bien marqué au niveau des zones littorales dans lesquelles l'océanité compense l'insuffisance quantité de pluie surtout en été qui enregistre une importante fréquence de nébulosité sous forme de brouillard, de rosée et de nuages qui pénètrent même dans les zones d'intérieur semi continentales. Elles sont très bénéfiques pour l'environnement et la végétation dont l'arganier qui en est très dépendant. Au point de vue thermique, les températures moyennes maximales s'imposent en atteignant des degrés élevés (plus de 40°C), les minimales montrent un gradient latitudinal croissant du Nord au Sud, les variantes tempérées et chaudes sont les plus communes. Les variantes froides et douces se limitent aux zones continentales d'altitude.

La synthèse bioclimatique a mis en relief les interactions des éléments climatiques disponibles, à savoir les précipitations y compris l'humidité relative de l'air et les températures, intervenant dans la répartition géographique de l'arganeraie dans la zone Centro-occidentale du Maroc. Le climagramme montre que les arganeraies étudiées se concentrent dans les différentes variantes du **bioclimat aride** dans les localités des provinces continentales en l'occurrence Taroudant et certaines parties enclavées des Ida Outanane, de Tiznit et Sidi Ifni. Le **bioclimat semi-aride** est cantonné dans les localités littorales à semi continentales des provinces d'Agadir, Essaouira et Safi. Les diagrammes ombrothermiques appuient les résultats du climagramme. Ils montrent que la période sèche, s'étalant sur 7 à 12 mois, augment du Nord au Sud et de l'Ouest vers l'Est.

L'analyse phyto-écologique multidimensionnelle avait pour objectif la caractérisation écologique des groupements végétaux individualisés au sein de chaque province par le biais de l'analyse floristique des espèces exprimées selon leur fréquence, sur la base de modalités de variables assez influentes, cas de l'altitude, climat et bioclimat. Elle a permis d'approcher les conditions topoclimatiques des groupements étudiés et montre le chauvechement et le continuum spatial des types d'arganeraies analysées.

Les techniques de cartographie utilisées pour l'actualisation des contenus des variables retenues et les méthodes d'analyses et de traitement des données biotiques et abiotiques sont bien mises en évidence dans cette étude. Elles visent la détermination de la relation entre l'origine géographique et les produits et les sous-produits dont l'huile d'argane par sa composition chimique et de sa qualité par les marqueurs géographiques et biologiques, principal objectif de cette investigation et aidant à sa gestion et sa valorisation durables.

Références

- Angot A. (1906). Etude sur le régime pluviométrique de la méditerranée. C.R. Congr. Soc. Sav.: 120-134.
- Barbéro M., Benabid A., Quézel P., Rivas-Martinez S. & Santos A. (1982). Contribution à l'étude des Acacio-Arganetalia au Maroc sud-occidental. Documents phytosociologiques. V.N.S. VI. Camerino. 311-338.
- Barbero, M., Benabid, A., Quézel, P., Rivas-Martínez, S., & Santos, A. (1982). Contribution à l'étude des Acacio-Arganietalia du Maroc sud-occidental. *Documents phytosociologiques. Nouvelle série Bailleul Nord Dépt*, 6, 331-338.
- Barbero, M., Benabid, A., Quézel, P., Rivas Martinez et Santos. (1982). Contribution à l'étude des Acacio-Arganietalia du Maroc sud-occidental. *Documents phytosociologiques. Nouvelle série Bailleul Nord Dépt*, vol. 6, p. 331-338.
- Benabid A. (1976). Etude écologique, phytosociologique et sylvopastorale de la tétraclinaie de l'Amsittène. Thèse de 3ème cycle, Université Aix-Marseille III, 1976, 155 p.
- Benabid A. (1982). Bref aperçu sur la zonation altitudinale de la végétation climacique du Maroc. *Ecologia mediterranea*, Vili (1-2), Saint-Maximin.
- Benabid A. et Fennane M. (1994). Connaissances sur la végétation du Maroc : Phytogéographie, phytosociologie et séries de végétation. *L.azaroa* 14 : 21-97
- Benabid, A., & Melhaoui, Y. (2011). Écosystèmes naturels à Arganier (*Argania spinosa*). Patrimoine national et universel : Bio-écologie, phytosociologie, phytodynamique et ethnobotanique. Actes du premier congrès international de l'arganier, 39-47.
- Blanquet B et Maire R. (1924). Etudes sur la Végétation et la Flore Marocaines. Comptes-Rendus des Herborisations de la Société Botanique de France, Session du Maroc. Mémoires de la société des sciences naturelles du Maroc. N° VIII. 256p.
- Boudy P., (1950). Economie forestière nord-africaine. Tome 2 : Monographie et traitement des essences forestières. Larose. Paris.
- Dervin C., (1990). Comment interpréter les résultats d'une analyse factorielle des correspondances? Service des études statistique, ITCF, Paris, 75p.
- El Wahidi F. et Lembre C. (2016). Arganeraie marocaine. Alliance multiséculaire entre les hommes et la nature. Projet Maroc – Belgique sur la stratégie d'aménagement de la réserve de Biosphère de l'Arganeraie.
- Elgadi, S., Ouhammou, A., Taous, F., Zine, H., Papazoglou, E. G., Elghali, T., Amenzou, N., Aitlhaj, A., El Allali, H., & El Antari, A (2021). Combination of stable isotopes and fatty acid composition for geographical origin discrimination of one argan oil vintage. *Foods*, 10(6), 1274. <https://doi.org/10.3390/foods10061274>
- Elgadi, S., Ouhammou, A., Zine, H., Maata, N., Aitlhaj, A., El Allali, H., & El Antari, A. (2021). Discrimination of Geographical Origin of Unroasted Kernels Argan Oil (*Argania spinosa* (L.) Skeels) Using Tocopherols and Chemometrics. *Hindawi Journal of Food Quality*. Volume 2021, Article ID 8884860, 9 pages <https://doi.org/10.1155/2021/8884860>
- Emberger L. (1939). Aperçu général sur la végétation du Maroc. Mémoire hors-série de la Société de Sciences Naturelles du Maroc, 157 pages, 1 carte hors-texte.
- Faouzi Kh., Rharrabti Y., Boukroute A., Mahyou M., Berrichi A. (2015). Cartographie de l'aire de répartition de l'arganier (*Argania spinosa* L. Skeels) dans la région orientale du Maroc par e G.P.S.

combiné au S.I.G. Revue « Nature & Technologie ». C-Science de l'Environnement, n° 12/Janvier 2015. Pages 16 à 24.

Emberger L., (1938). Les arbres du Maroc et comment les reconnaître. Larose, éditeurs, Paris, 318 p.

Fennane M. & Ibn Tattou M., 1998 - Catalogue des plantes vasculaires rares, menacées ou endémiques du Maroc. *Bocconea* **8**, 243p.

Fennane M. (2003). Inventaire des communautés végétales à l'aide du phytosociologue, au Maroc. In: *Ecologia mediterranea*, tome 29 n°1. pp. 87-106; doi : <https://doi.org/10.3406/ecmed.2003.1531>

Fennane M. (2018). Eléments pour un Livre rouge de la flore vasculaire du Maroc. Fasc. 5. Cactaceae - Euphorbiaceae . Edit. Tela-Botanica. Licence CC-BY NC ND.

Gauquelin T., Savoie J.M., Barreau D., Baudière A. (1993). Commentaire phytogéographique sur quelques groupements végétaux rencontrés dans le sud du Maroc septentrional. *Bulletin de la Société Botanique du Centre-Ouest. Nouvelle série. Tome 24.* 391-414.

Géhu J.M. et Biondi E. (1996). Apport à la connaissance de la végétation du littoral marocain sud-occidental : Les communautés végétales psammophiles des dunes et placages sableux du Maroc macaronésien. *Bulletin de la société botanique du Centre Ouest. Nouvelle série, Tome 27.* 179 – 214.

M'hirit O, Benzyane M, Benchekroun F, El Yousfi SM, Bendaanoun M (1998) L'arganier, une espèce fruitière forestière à usages multiples. Mardaga, Sprimont, Belgique, pp. 145-150.

Makaoui, A., Orbi, A., Hilmi, K., Zizah, S., Larissi, J., & Talbi, M. (2005). L'upwelling de la côte atlantique du Maroc entre 1994 et 1998. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(16), 1518-1524.

Médail F. et Quézel P. (1999). The phytogeographical significance of S.W. Morocco compared to the Canary Islands. *Plant Ecology* 140: 221-244.

Messad S. (2008). Traitement statistique des données zootechniques et sanitaires : les méthodes d'analyses factorielles et de classification. Montpellier: CIRAD, 75 p.

Msanda F, El Aboudi A, Peltier J.P. (2005). Biodiversité et biogéographie de l'arganeraie marocaine *Cahiers. Agricultures* 14(4):357–364.

Msanda, F., Mayad, E.H. & Furze, J.N. (2021). Floristic biodiversity, biogeographical significance, and importance of Morocco's Arganeraie Biosphere Reserve. *Environ Sci Pollut Res* **28**, 64156–64165 <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11936-0>.

Msanda, F.; El Aboudi, A.; Peltier, J.-P. (2005). Biodiversité et biogéographie de l'arganeraie marocaine. *Agriculture* 2005, 14, 357–364

Naggar M. (2018). La gestion durable de l'arganeraie et les enjeux de lutte contre la désertification. *Revue Espace Géographique et Société Marocaine* N° 22. 81-91.

Péguy Ch., 1961. Précis de climatologie. Paris, Masson. 347p.

Peltier J.P. (1982). La végétation du bassin versant de l'oued Souss (Maroc). Thèse de doctorat ès-sciences. Université scientifique et médicale de Grenoble, 201p.

Peltier J.P., (1982). La végétation du bassin versant de l'oued Souss (Maroc). Thèse doctorat d'État, Univ. Scientifique et Médicale de Grenoble. 201 p.

Peltier J-P. (1983). Les séries de l'arganeraie steppique dans le Sous (Maroc). *Ecologia mediterranea*, (9) 1, 1983. pp. 77-88; <https://doi.org/10.3406/ecmed.1983.1019>. https://www.persee.fr/doc/ecmed_0153-8756_1983_num_9_1_1019.

Peltier, J. P. & Msanda, F. (1995). Diversité et originalité de la steppe à *Euphorbia officinarum* L. subsp. *echinus* (Hooker fil. et Cosson) Vindt du sud-ouest Marocain. *Feddes Repertorium*, 106(3-4), 215-229.

Piqué, A.; Soulaïmani, A.; Hoepffner, C.; Bouabdelli, M.; Laville, E.; Amrhar, M.; Chalouan, A. "Géologie du Maroc" (Nouvelle Edition); Géode Editions: Marrakech, Maroc, 2007; 287p

- Ramírez J.J., Durán R.C., & Núñez J. C. S. (2016). Taxonomy and systematics. Checklist of the native vascular plants of Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 87 (2016) 559–902
- Saidi, A., 1982, CARTE GÉOLOGIQUE DU MAROC AU 1/50 000.
- Sauvage., (1963). Les étages bioclimatiques. Comité National de géographie du Maroc. Atlas du Maroc. Notices explicatives. Section II. Physique du Globe et Météorologie. Planche N° 6 b.
- Swenson U. and Anderberg A. A. (2005). Phylogeny, character evolution, and classification of Sapotaceae (Ericales). *Cladistics* 21. 101–130.
- Taleb, M. S., & Fennane, M. (2019). Vascular plant communities of Morocco. *Phytosociology, Ecology and Geography*. New York, USA: Springer International Publishing. 167pp.
- Weisrock A. et Lunski S. (1987). Le karst post-pliocène de la région de Safi (Maroc atlantique). *Karstologia*, vol. 9, no 1, p. 31-36

Chapitre 2

Discrimination of geographical origin of unroasted kernels Argan oil (*Argania spinosa* (L.) Skeels) using tocopherols and chemometrics

Cet article a été publié en Septembre 2021 dans la revue *Journal of food quality* Web of Science-(IF-2,45)/Scopus-(SJR-0,54, Q2).

Sara Elgadi^{1, 5}, Ahmed Ouhammou¹, Hamza Zine¹, Nadia Maata², Abderrahmane Aitlhaj³, Hassan El Allali⁴ and Abderraouf El Antari⁵

1. Laboratory of Microbial Biotechnology, Agrosiences and Environment. Regional Herbarium 'MARK'. Faculty of Sciences-Semlalia. Cadi Ayyad University. BP. 2390. 40 000. Marrakech. Morocco

2. Official Laboratory for Chemical Analysis and Research (LOARC). Casablanca. Morocco

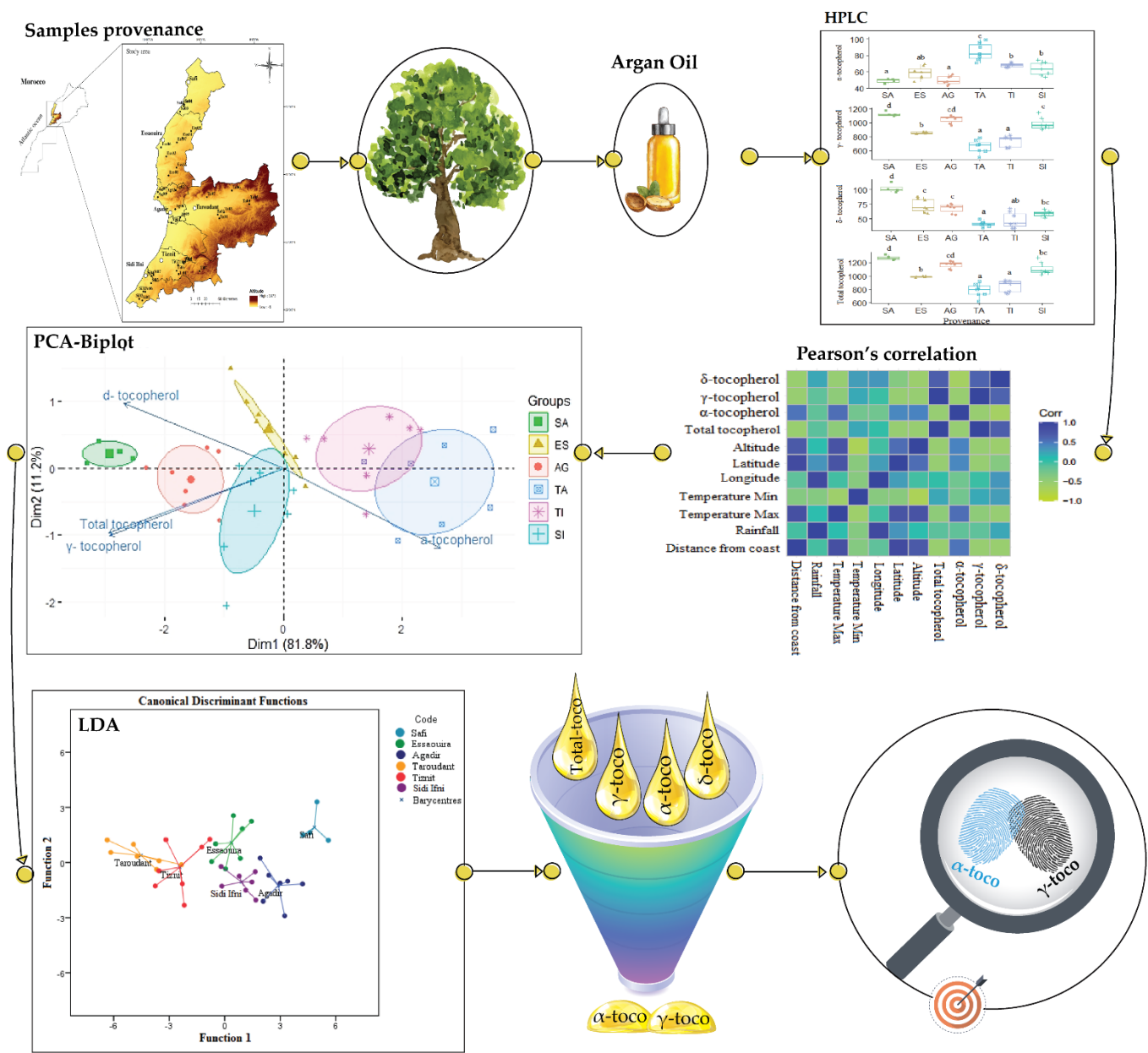
3. National Agency for the Development of the Oasis and Argan Zones (ANDZOA). Agadir 80000, Morocco.

4. The Interprofessional Federation of the Argan Sector, Agadir 80000, Morocco.

5. Laboratory of Agro. Food Technology and Quality. Regional Center for Agronomic Research of Marrakech, National Institute of Agronomic Research (INRA).Marrakech. Morocco

Après la présentation détaillée de la zone d'étude et la mise en exergue de ses originalités et atouts, ainsi que l'individuation des différents groupements végétaux dans l'arganeraie de centre-ouest marocain. Le deuxième chapitre a concerné l'étude des propriétés chimiques de l'huile cosmétique d'argan. Il englobe le premier pas vers l'identification précise des différents marqueurs de l'origine géographique pour la protection et la valorisation de l'huile d'argan. Ce chapitre expose le potentiel de la concentration en tocophérols comme un outil de discrimination de l'origine géographique de l'huile d'argan en utilisant les techniques chimiométriques de prédiction.

Résumé graphique



Abstract

Valorisation of Argan oil requires the precise identification of different provenances markers. The concentration of tocopherol is regarded as one of the essential parameters that certifies the quality and purity of Argan oil. In this study, 39 Argan samples from six different geographical origins (Safi, Essaouira, Agadir, Taroudant, Tiznit and Sidi Ifni) from the central west of Morocco were collected and extracted using cold pressing. The total tocopherol amount was found to range from 783.23 to 1271.68 mg/kg. Generally, γ -tocopherol has the highest concentration in Argan oil. It should also be noted that the geographical origin was found to have a strong effect on the amounts of all tocopherol homologues studied. Principal component analysis of tocopherol concentrations highlighted a significant difference between the different provenances. The content of tocopherol has also been found to be strongly influenced by the distance from the coast and altitude, whereas no significant effect was found regarding other ecological parameters. The prediction ability of the LDA models was 87.2%. The highest correct classification was revealed in coastal provenances (100%) and the lowest values were from the continental ones (71.4%). These results provide the basis for determining the geographical origins of Argan oil production with well-defined characteristics to increase the product's value and the income of local populations. In addition, this study provides a very promising basis for developing Argan varieties with a high content of tocopherol homologues, as well as contributing to the traceability and protection of Argan oil's geographical indication.

Keywords: *Argania spinosa*; LDA; Geographical origin; Morocco; Tocopherols.

I. Introduction

Argan (*Argania spinosa* (L.) Skeels) is an endemic plant that represents the only species of genus *Argania* and the family of Sapotaceae in North Africa. Currently, the Moroccan Argan forest spans the fertile Souss Valley, the Anti-Atlas mountain range and the coastal regions between Safi and Agadir [1]. This area exhibits high plant diversity and endemism [2]. The Argan forest, recognised in 1998 as a UNESCO biosphere reserve (Man and the Biosphere Reserve) [3], and it significantly contributes to the economic and social development in Morocco and sometimes even represents the only source of income for the local population [4]. Argan kernels provide a precious oil that is rich in anti-oxidant compounds, such as saponins and tocopherols [5], as well as fatty acids [6] and sterols [7].

Vitamin E is a vitamin of eight isomers: four tocopherols and four tocotrienols [8]. Tocopherols are the isomers with the greatest biological activity [9]. For example, α -tocopherol (5,7,8-trimethyltolcol) is effective against ischemic liver cell damage thanks to its free radical scavenging properties [10]. Moreover, γ -tocopherol (7,8-dimethyltolcol) has been found to have an effect on various types of tumours, even more powerful than α -tocopherol, β -tocopherol (5,8-dimethyl tolcol) and δ -tocopherol (8-methyl tolcol) [11]. Tocopherols and tocotrienols are present in fruits and plant seeds [12]. Therefore, fixed oils are a major source of tocopherols [13]. Several studies have compared tocopherol levels in Argan oil and other oils such as olive oil and prickly pear seed oil [14], The results showed that Argan oil has very high concentrations of tocopherols, especially the γ -tocopherol homologue [15]. In general, the presence of tocols prevents lipid oxidation and, hence, maintains the quality and shelf life of oils [16].

Argan oil plays a potential role in the prevention of several diseases [17], including cancer [18] and has lipid-lowering and anti-oxidant properties [19]. These pharmacological properties can be attributed to its high content of tocopherols, especially γ -tocopherol [8]. Argan oil is richer in linoleic acid than olive oil (5.4%–13.2% compared to 32.3%–34.1%, respectively) [6]. The total tocopherol content is considered a purity criterion by the Moroccan 08.5.090 standard for Argan oil, with an established quantity that should fluctuate between 600 and 900 mg/kg of oil [20]. Gharby *et al.* [21] reported that the tocopherol content ranges between 675 and 871 mg/kg of oil, but a higher range (687.4–1068 mg/kg of oil) has been observed by Aithammou *et al.* [22]. This variability in tocopherol concentration can be

attributed to many factors, such as the climate [23], variety [24], extraction method [25], storage conditions [26], fruits form [27] and fruits maturity [28].

The genotype has an important impact on oil yield and composition [29]. In the case of apricots (*Prunus armeniaca* L.), the genetic factor influences the composition of tocopherol homologues [29]. Furthermore, the variability of tocopherol composition in various seed oils recovered from the by-products of the apple industry has been attributed to cultivars [30]. Using SRAP and REMAP markers, strong genetic differentiation has been found within Argan populations [31]. *Argania spinosa* forests have been considered as ‘climax’ [32]. This state of equilibrium has been reached by spontaneous vegetation under the action of the natural environment, excluding direct or indirect human action [33].

The consumption of cold-pressed oils has increased in recent years [34]. The global Argan oil market is expected to grow at a revenue-based compound annual growth rate of 10.8% between 2020 and 2027 [35]. Such development requires more control to protect the consumer and the producer from fraud. In fact, several marketing and promotional strategies aimed to relate food products to their geographical origin. European Union legislation, for example, allows the reservation of geographical designations for food products, such as Protected Designations of Origin (PDO) and Protected Geographical Indications (PGI) [36]. The combination of chemical composition and chemometric tools such as linear discriminant analysis (LDA) [37] and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) [23] have been used for determining authenticity and quality control of argan oil. However, there is a lack of studies focussing on the relationship between the tocopherol concentration in Argan oil and geographical origin [22].

The aim of this study was to determine the tocopherols concentration from six Moroccan provinces: Safi, Essaouira, Agadir Ida Outanane, Taroudant, Tiznit and Sidi Ifni, associated with the chemometric technique LDA, to classify Argan oil according to its geographical origin. This may constitute the basis for geographical origin certification that helps to protect the consumer and the producer from fraud and increase the value of Argan oil in the world market. In addition, it can provide a database for updating the Moroccan standard on Argan oil.

II. Materials and Methods

II.1 Plant material.

Argan plants naturally reproduce by seeding, which is the very reason for their great diversity. However, this study focussed on the potential for industrial production representative of a specific environment, very close to that intended for industrial production by local women's cooperatives. To this end, a maximum of trees contributed to the constitution of our batches of samples. Therefore, Argan fruits from natural populations were collected at full maturity from adult trees from six different geographical origins in the central west of Morocco: Safi (for the first time), Essaouira, Agadir, Taroudant, Tiznit and Sidi Ifni (Figure 1).

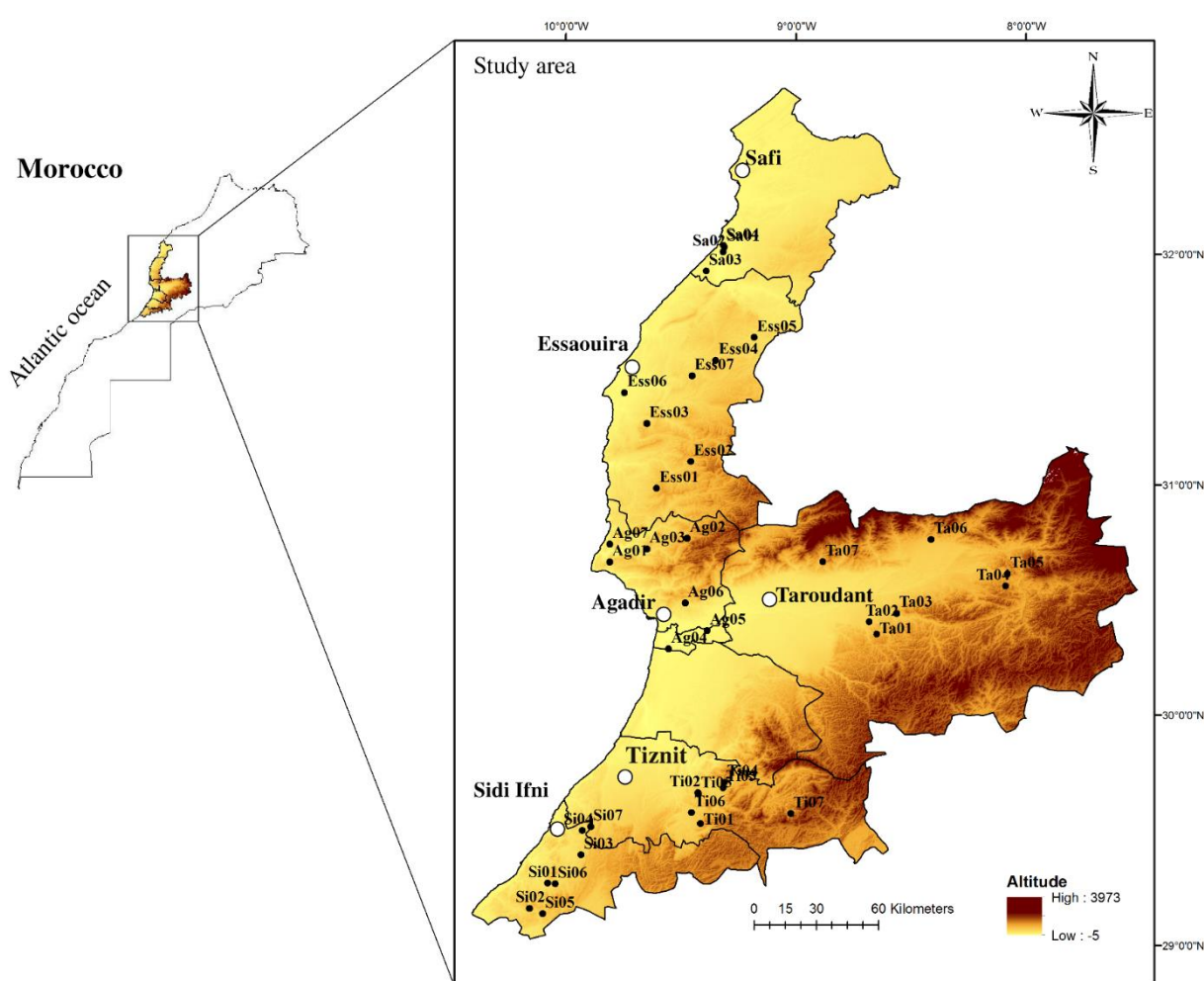


Figure 1. Altitude of sampling provenances and localisation of argan samples

This area is characterised by a semi-arid to arid climate [1]. Temperature and rainfall data were collected from different weather stations for the period from 1989 to 2019 (Table 1).

A total of 39 samples were collected between August and November 2018. After sun drying during two weeks, 20 kg of fruit for each studied point was de-pulped and crushed manually between two stones, yielding between 800 and 1500 g of kernels for each sample. The kernels were then tightly closed by vacuum to eliminate oxidation until the extraction process. The moisture within the Argan kernels was measured using the international standard ISO 665 to be in the range from 3% to 5%.

Table 1. Geographical parameters of the six sampled provenances of Argan trees.

Provenance	Code	Sample size	Latitude	Longitude	Altitude (masl*)	Temperature Min-Max (°C)	Rainfall (mm/year)	Distance from coast (km.a.c.f*)
Safi	SA	4	32°02'N	9°18'W	112	13.15-29.60	320.36	5.57
Essaouira	ES	7	30°59'N	9°36'W	138	13.50-26.40	292.17	19.77
Agadir	AG	7	30°22'N	9°23'W	103	12.92-24.55	264.40	22.27
Taroudant	TA	7	30°26'N	8°33'W	592	11.42-31.20	210.37	106.86
Tiznit	TI	7	29°41'N	9°19'W	497	12.70-26.31	205.47	62.54
Sidi Ifni	SI	7	29°23'N	9°56'W	349	13.44-28.70	155.92	21.95

* masl: meters above sea level * km.a.c.f: km as the crow flies

II.2 Oils extraction.

To allow the extrapolation of the results to potential production at the level of cooperatives and local industries, the extraction method used was identical to that used to produce Argan oil in Morocco. For this purpose, unroasted kernels were cold-pressed using an oil press (Komet CA59G; IBG Monforts Oekotec GmbH Co. KG, Mönchengladbach, Germany). The screw speed was maintained at 30 rpm, and the temperature of the heated press was fixed at 50 °C. The temperature of the obtained oil was 20 °C. Then, once the oil was decanted, it was preserved in 250 mL dark glass bottles in a refrigerator (at 4° C) filled with nitrogen to avoid oxidation. The oil yield varied between 48.43 and 50.67%.

II.3 Physicochemical Quality Parameters.

Free acidity (expressed as % oleic acid), spectrophotometric UV indices K₂₃₂ and K₂₇₀, peroxide value given as milliequivalents of active oxygen per kilogram of oil (mEq O₂/kg), and oil content (%) were determined according to ISO 660 (2009) [38], ISO 3656 (2002) [39], ISO 3960 (2007) [40], and ISO 659 (2009) [41], respectively.

II.4 Tocopherols composition.

According to ISO 9936 [42], 1 g of Argan oil was dissolved in 25 mL of isooctane/isopropanol (99:1, v/v). Tocopherols were determined using a Shimadzu LC-10 high-performance liquid chromatography system. The sample was first injected into a LiChrospher Si 60 column ($L = 250$ mm, $\Phi = 4.6$ mm id, $\delta = 5$ μ m film thickness), and then tocopherols were detected using an RF-10AXL HPLC Fluorescence Detector (Shimadzu, Columbia, MD, USA) at an excitation wavelength of 290 nm and an emission of 330 nm. The eluent used was a 99:1 isooctane/ isopropanol (V/V) mixture, and the flow rate was set at 1.2 mL/min. The tocopherol standards α -, β -, γ - and δ -tocopherols (Sigma-Aldrich, Madrid, Spain) and Argan oil samples were quantified simultaneously. The different compounds of tocopherol were identified by comparing the retention times with authentic standards and confirmed by extrapolating the peak area of the individual tocopherol to the pre-established specific tocopherol calibration curve.

II.5 Statistical analysis.

All statistical analysis were performed using IBM SPSS Statistics version 21 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) and R software version 3.6.2 (R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria). One-way analysis of variance (ANOVA) was performed followed by Tukey's post hoc test to determine the statistically significant differences between the means of tocopherol concentrations from different provenances ($p < 0.05$). Pearson's correlation heatmap was also assessed to determine the relationship between the geographical parameters and quantity of tocopherols. Furthermore, principal component analysis (PCA) was performed to study whether the means of those regions are significantly different. In addition, linear discriminant analysis (LDA) was applied for creating predictive models that maximize the discrimination of the predefined regions. The difference between means was normalized by a measure of the within-class variability. The statistical significance of each discriminant function was evaluated by Wilk's lambda.

III. Results and Discussion

III.1 Physicochemical Quality Parameters.

The oil content ranged between 50.94% in Agadir and 55.67% in Taroudant. The results obtained for the oil content are in agreement with the range obtained by Ait Aabd *et al.*, [43] (51.83-57.50%). The ANOVA followed by the Tukey's post hoc test confirmed significant differences between argan provenances. According to the Moroccan Normalization guidelines SNIMA 08.5.090 [20], argan oils extracted belong to the extra virgin argan oils category (Table 2). The lowest acidity value was found in Agadir (0.15%). However the highest value was detected in Safi (0.26%). The spectrophotometric UV indices K₂₃₂ and K₂₇₀ ranged between 0.94 to 1.05 and 0.14 to 0.17, respectively. Furthermore, the highest peroxyde value was noticed in Sidi Ifni (2.13 mEq O₂/kg oil) and lowest in Taroudant (1.46 mEq O₂/kg oil). The overall quality parameters confirmed the high quality of argan oil samples.

Table 2. Mean values and standard deviations of the oil content and quality parameters of argan oil from six provenances

Provenance	Safi	Essaouira	Agadir	Taroudant	Tiznit	Sidi Ifni	SNIMA 08.5.090
Oil content (% dry matter)	54.94 ± 1.6b	53.43 ± 0.68ab	50.94 ± 1.12a	55.67 ± 0.41b	51.57 ± 0.80a	55.22 ± 0.36b	-
Free fatty acid (%)	0.26 ± 0.02c	0.24 ± 0.03b	0.15 ± 0.01a	0.20 ± 0.01ab	0.24 ± 0.02b	0.20 ± 0.01b	≤ 0.8
K ₂₃₂	1.05 ± 0.07a	0.94 ± 0.09a	1.14 ± 0.05a	1.03 ± 0.07a	0.98 ± 0.04a	0.99 ± 0.07a	
K ₂₇₀	0.18 ± 0.03a	0.15 ± 0.02a	0.17 ± 0.03a	0.17 ± 0.01a	0.15 ± 0.02a	0.14 ± 0.02a	≤ 0.35
Peroxyde value (mEq O ₂ /kg oil)	1.68 ± 0.06ab	1.57 ± 0.13a	1.97 ± 0.06cd	1.46 ± 0.04a	1.83 ± 0.08bc	2.13 ± 0.07d	≤ 15

Values are expressed as mean ± SD. Different letters in the same line designate significant differences (p<0.05). K₂₃₂ and K₂₇₀: ultraviolet specific extinction at 232 and 270 nm

III.2 Tocopherols composition.

As shown in Figure 2, γ -tocopherol was found to be the predominant tocopherol in Argan oil, followed by α -tocopherol and δ -tocopherol (γ -tocopherol > α -tocopherol $\approx$ δ -tocopherol). γ -tocopherol represents 90% of the total tocopherols [44]. Compared to the literature, similar results were obtained for mechanically pressed unroasted Argan kernels from old trees [22]. The results showed that β -tocopherol is present in Argan oil but in very low concentrations. Generally, the results obtained in this study are similar to those of Taribak *et al.* [45]. It should be noted, however, that β -tocopherol has not been detected in any of the studied oils, which might be attributed to the extraction method [46]. The amounts of tocopherols established by the Moroccan 08.5.090 standard [20] for extra virgin Argan oil are 18–75 mg/kg for α -tocopherol, 640–810 mg/kg for γ -tocopherol, 54–110 mg/kg for δ -tocopherol and 600–

900 mg/kg for total tocopherol. All values were within the established limits, except for γ -tocopherol in the samples from Safi, Essaouira, Agadir and Sidi Ifni, which exceeded 810 mg/kg. These provinces presented the coastal Argan samples. Abbasi *et al.* [47] reported that the tocopherols amount are strongly affected by abiotic stress especially γ -tocopherol that has an important role in protecting polyunsaturated fatty acids from oxidation. Therefore, increasing seed longevity [48]. The results obtained prove that the current standard does not reflect the real performance in terms of the concentration of tocopherols in Argan oil. Considering the geographical origins, ANOVA revealed a high variability for the three tocopherol homologues. The highest total tocopherol content was found in Safi (1271.68 mg/kg), followed by Agadir (1167.93 mg/kg) and Sidi Ifni (1106.87 mg/kg). These values were confirmed by the results obtained by Aithammou *et al.* [22] for the same extraction method and age of trees. The lowest value was obtained for the samples from Taroudant (783.23 mg/kg), although this value remains very important. Kharbach *et al.* [23] reported that the samples of Taroudant (865 mg/kg of oil) have the lowest total tocopherol content, which is in line with the results obtained for the same region. The value of γ -tocopherol was found to range from 1120.75 mg/kg of oil in Safi to 657.10 mg/kg of oil in Taroudant. This range agrees with other results in the literature: 700.30–1068 mg/kg of oil [22], 664- 802 mg/kg [23], 531-756 mg/kg oil [6] and 545.9-701.1 mg/kg oil [49]. The value of α -tocopherol was found to range from 84.59 mg/kg in Taroudant to 48.72 mg/kg in Safi, with both regions exhibiting the lowest and highest altitude (Table 1). The range of variability for δ -tocopherol was found to be between 102.21 mg/kg of oil in Safi and 41.53 mg/kg of oil in Taroudant. These detected values are consistent with the interval found by Aithammou *et al.* [22] (36.42–132 mg/kg of oil) and Kharbach *et al.* [23] (58.55–104.36 mg/kg of oil). According to El Kharrassi *et al.* [14] compared to olive oil, Argan oil has the highest concentration of total and γ -tocopherols, whereas the highest concentration of α -tocopherol was observed in olive oil. In addition Gharby *et al.* [50] mentioned that Argan oil has the highest concentration of α -and δ - tocopherols compared to cactus pear seed oil. As reported by Górnas *et al.* [29], biotic factors (genotype) also affect the content of tocopherols in fruit kernel oils, such as apple cultivars (*Malus domestica* Borkh.), plums (*Prunus domestica* L.) and apricots (*Prunus armeniaca* L.). However, Dolde, Vlahakis and Hazebrock [51] reported that the composition of tocopherols in oil seeds, such as sunflower and soybean, is highly dependent on the environmental conditions rather than on the genetic factors.

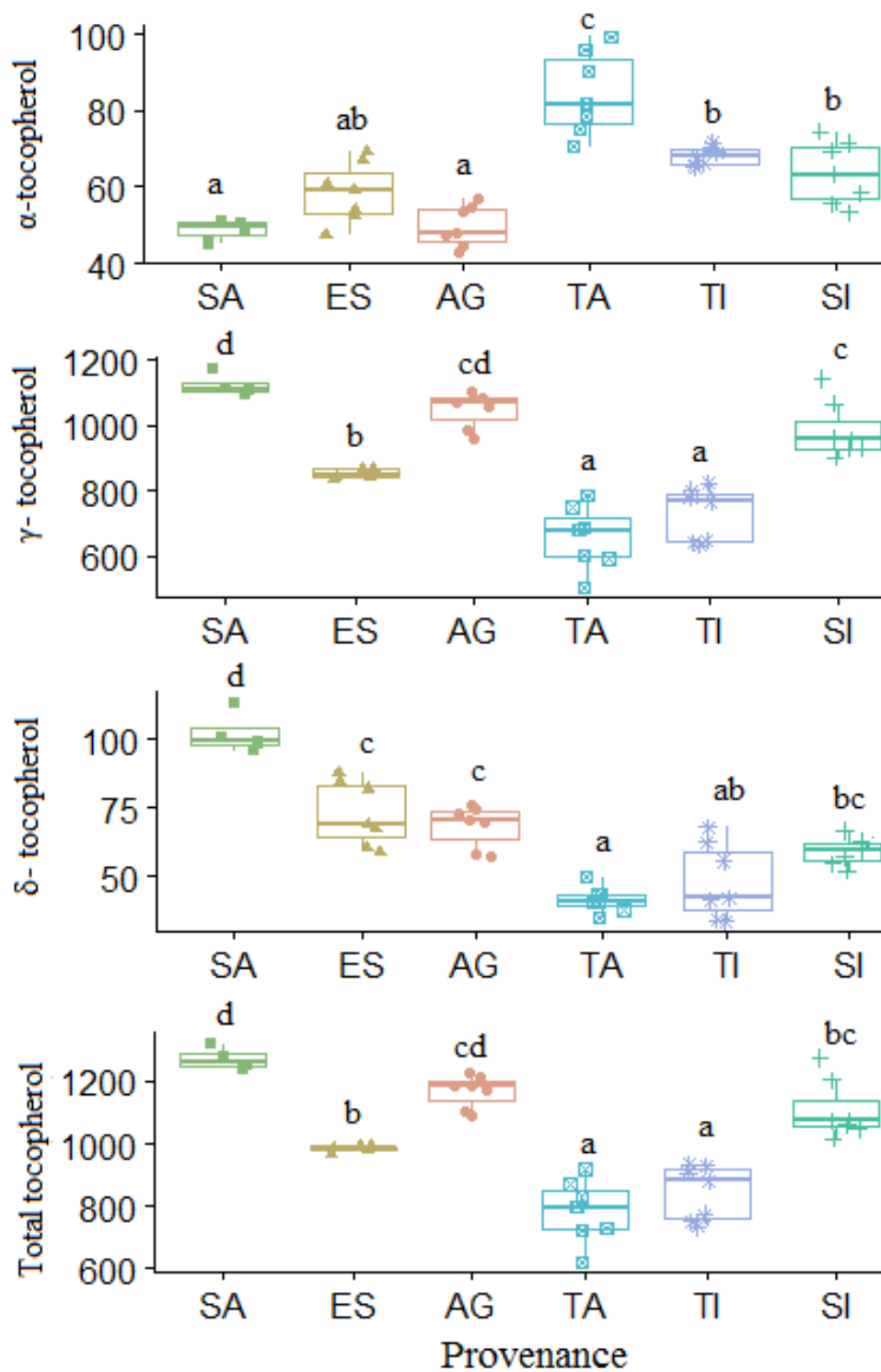


Figure 2. Boxplot of (a) α -tocopherol (b) γ -tocopherol (c) δ -tocopherol and (d) total tocopherol in Argan oil samples collected in different provinces (Safi (SA), Essaouira (ES), Agadir (AG), Taroudant (TA), Tiznit (TI), and Sidi Ifni (SI). Significant differences ($p < 0.05$) were expressed by different letters

III.3 Relation between geographical parameters and tocopherols.

Pearson's correlation analysis (Figure 3) revealed that the longitude, minimum temperature and rainfall have no effect on the tocopherol content. However, distance from the coast was found to exhibit a strong positive correlation with α -tocopherol and a strong negative correlation with γ -tocopherol, δ -tocopherol and total tocopherols (correlation is significant at the 0.01 level). A significant correlation was also found between altitude and tocopherol homologues. Although latitude was found to have a significant negative correlation with γ -tocopherol and total tocopherol, a significant positive correlation was observed with α -tocopherol. The maximum temperature was also found to have a significant correlation with α -tocopherol. The geographical origin can affect the process of producing effective substances especially climatic conditions [52]. To date, few studies have been conducted to investigate the interaction between climatic parameters and tocopherol content in Argan oil. However, levels of γ -tocopherol increased with average temperature and total sunshine and decreased with total rainfall in flaxseed oil [53]. Total tocopherol of olive oil are also strongly affected by altitude [54]. Other Argan oil compounds such as fatty acids were influenced by altitude, latitude and longitude [37], [43], [55].

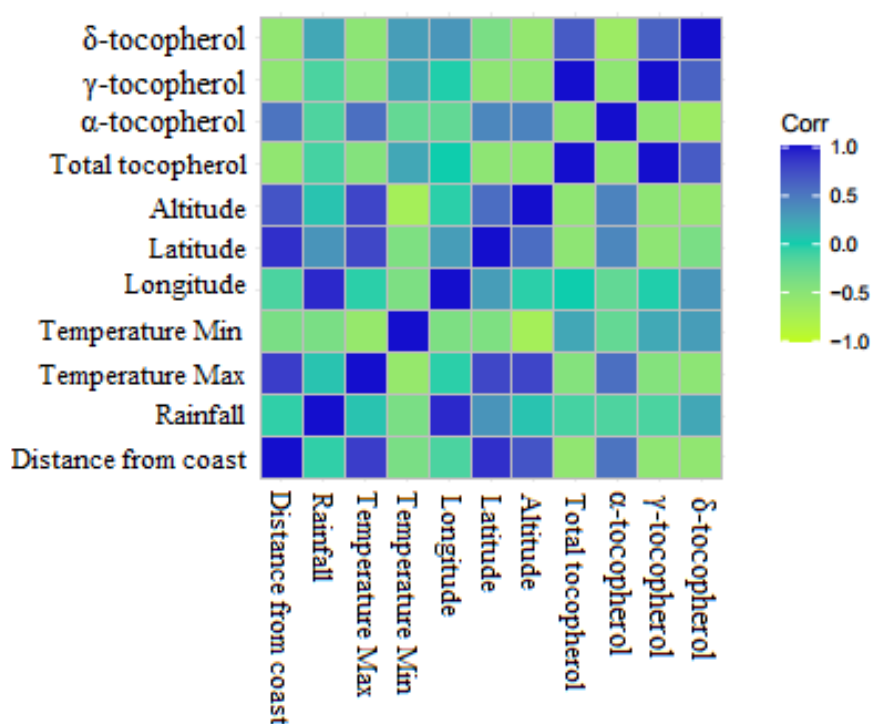


Figure 3. Heatmap of Pearson's correlation coefficient between tocopherol homologues and geographical parameters.

III.4 Principal compound analysis (PCA).

Figure 4 shows a score PCA plot for the 39 Argan oil samples obtained from six provenances according to their tocopherol composition. The first two principal components were found to be very significant, explaining 93% of the total inertia. Although PC1 (Dim1) presented 81.8% of the total inertia, PC2 (Dim2) presented 11.2%. PC1 allowed classifying the coastal sampled locations on the left side of PCA. However, the most continental sampled provinces were plotted at the right side. In the one hand, the coastal locations were characterised by high concentration of γ -tocopherol, δ -tocopherol and total tocopherols. In the other hand, α -tocopherol was the most remarkable tocopherol homologue in continental Argan oil samples. Hence, it can be concluded that γ -tocopherol could be used as a good marker of coastal Argan oils. In addition, α -tocopherol can be used as marker of the continental provinces. The geographical origin has a high impact on tocopherols concentration, showing a distinction between the different studied provenances. This easy, rapid and precise technique can be used by laboratories to protect this precious oil from fraud such as adulteration by other cheaper oils. Furthermore, it can be combined with other analysis such as fatty acids and phytosterol to enhance the Protected Geographical Indication (PGI).

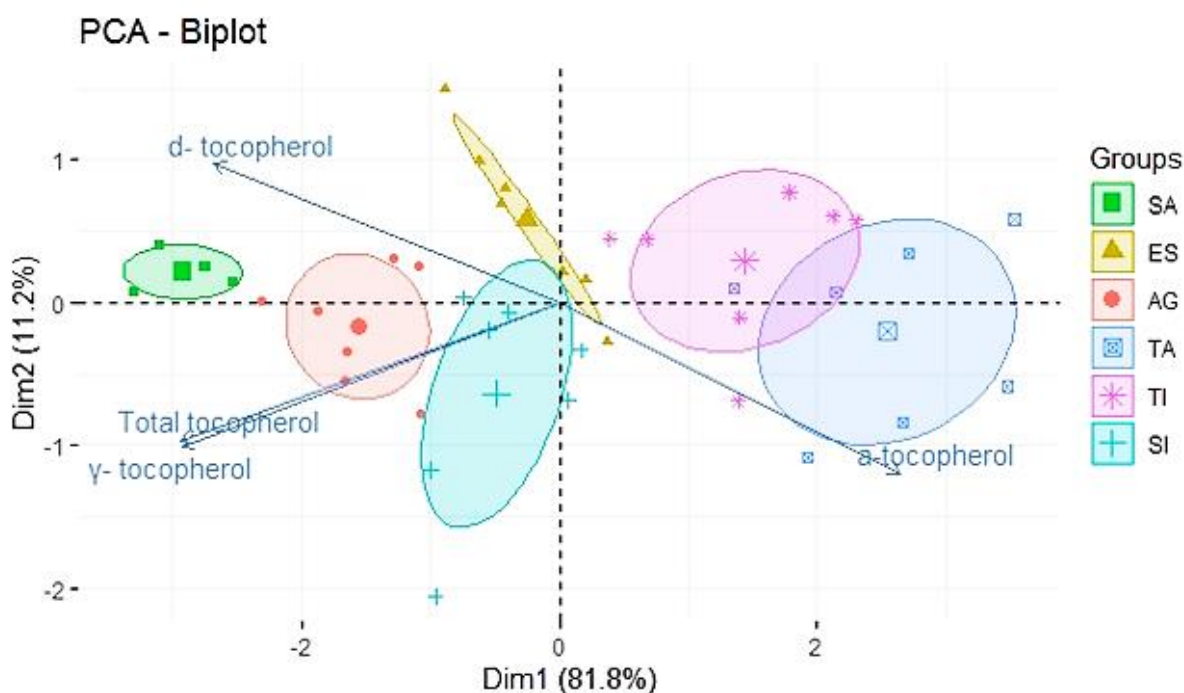


Figure 4. Principal Component Analysis (PCA) on the tocopherols amount of 39 samples from six different provenances (SA: Safi, ES: Essaouira, AG: Agadir, SI: Sidi Ifni, TA: Taroudant, TI: Tiznit)

III.5 Linear Discriminant Analysis (LDA)

LDA is a supervised method contrarily to PCA. It was performed to create discriminant models for the classification of argan oil according to their geographical origin. Figure 5 shows the LDA scatter plot for Argan oils from six provinces. The most continental provinces were plotted in the left of function 1. Whereas the coastal origins are plotted in the right. A distinct separation between the provinces was relevant, with some overlap, notably between Tiznit and Taroudant, which can be explained by the geographical parameter similarities.

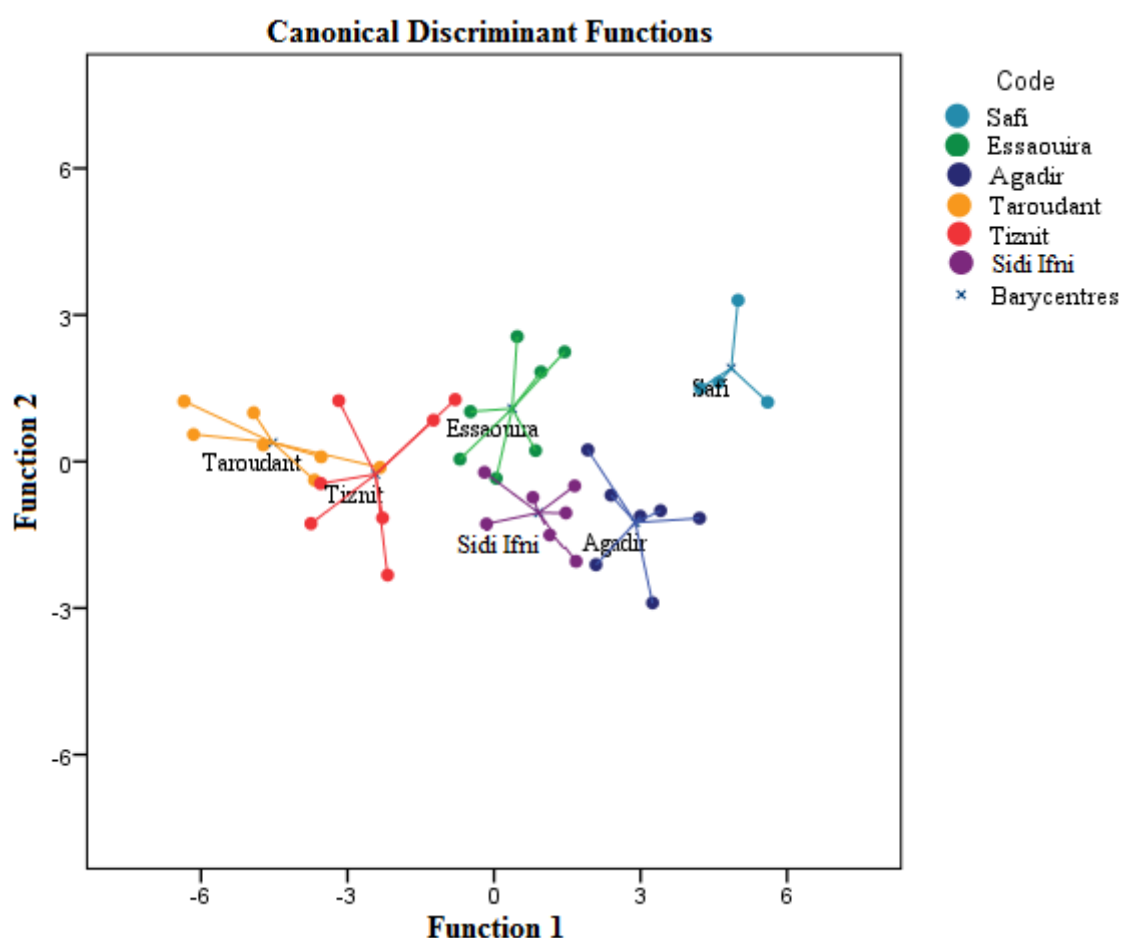


Figure 5. Linear discriminant analysis based on the tocopherols amount of 39 samples from six different provenances

Table 3 presented three discriminant functions created based on Wilks' lambda values, which explained 100% of the variance (Table 3); 85.7% of the total variance was explained by function 1, 10.7% explained by function 2, 3.6% explained by function 3. The Wilks' lambda values (Table 3) for the functions 1, 2 and 3 were 0.02, 0.30 and 0.69, respectively, with p -

values 0.0001, 0.0001 and 0.007. The LDA showed a good predictive ability, which can reach up to 87.2% for the geographical origin classification.

Table 3. Discriminant functions elaborated based on the tocopherols composition.

Functions	Wilks' Lambda	p-Value	Variance (%)	Cumulative (%)	Canonical correlation
Function 1 = $-0.70 - 0.07 \times \alpha\text{-tocopherol} + 0.01 \times \gamma\text{-tocopherol} + 0.035 \times \delta\text{-tocopherol}$	0.02	0.000	85.7	85.73	0.95
Function 2 = $-4.33 + 0.05 \times \alpha\text{-tocopherol} - 0.01 \times \gamma\text{-tocopherol} + 0.11 \times \delta\text{-tocopherol}$	0.30	0.000	10.7	96.42	0.75
Function 3 = $-14.36 + 0.11 \times \alpha\text{-tocopherol} + 0.01 \times \gamma\text{-tocopherol} + 0.01 \times \delta\text{-tocopherol}$	0.69	0.007	3.6	100.00	0.55

Discriminant models allowed a good prediction with an accuracy of 87.2% (table 4). Essaouira, Safi and Sidi ifni presented the highest correct classification rate (100%) followed by Agadir (85.71%). Taroudant and Tiznit presented the lowest classification rate (71.42%). According to the results obtained by Elgadi *et al.* [37] using the LDA models based on fatty acids and isotope combination, the classification rate fluctuate between 85.7 and 100% which was near to the obtained accuracy. Furthermore, the results obtained by Miklavčič *et al.* [56] based on fatty acid profil using OPLS-DA showed similar rate (82% - 100%). The high accuracy confirms the performance of tocopherols in the prediction of geographical origin.

Table 4. Performance of the LDA classification models for the geographical origin prediction.

Provenance of origin	predicted origin					
	Agadir	Essaouira	Safi	Sidi Ifni	Taroudant	Tiznit
Agadir	6 (85.71%)	1 (14.28%)	0.0	0.0	0.0	0.0
Essaouira	0.0	7 (100%)	0.0	0.0	0.0	0.0
Safi	0.0	0.0	4 (100%)	0.0	0.0	0.0
Sidi Ifni	0.0	0.0	0.0	7 (100%)	0.0	0.0
Taroudant	0.0	0.0	0.0	0.0	5 (71.42%)	2 (28.57%)
Tiznit	0.0	2 (28.57%)	0.0	0.0	0.0	5 (71.42%)

IV. Conclusion

The results obtained in this study highlight the impact of the geographical origin on the α -tocopherol, γ -tocopherol and δ -tocopherol content. Pearson's correlation analysis showed that the longitude, minimum temperature and rainfall have no effect on the content of tocopherols. However, distance from the coast, latitude and altitude were found to exhibit a strong correlation with the majority of tocopherol homologues. PCA also revealed a distinction between provenances and confirmed the relationship between the geographical origin and tocopherol concentration. In addition, α -tocopherol and γ -tocopherol could present promising markers to protect the geographical origin of Argan oil. The prediction ability of the LDA models was 87.2%. Our study provided interesting results for the variability of tocopherol homologues concentration in six principal production areas. This technique is easy, not expensive and rapid for laboratories to control the fraud related to geographical origin. These results present a preliminary basis for determining the geographical origins of Argan oil and highlight the real tocopherols potential in Argan oil which varies from: 1271.68 to 844.05 mg/kg of oil. Further future studies more exhaustive are planned to confirm the obtained results. In addition, more studies focussing on biotic factors (genotype/variety/cultivar) are necessary to have a clear overview of tocopherol homologues variation, which is very useful particularly for varietal selection objectives.

Data Availability

The data used to support the findings of this study are available from the corresponding author upon request.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest

Acknowledgment

The authors are very grateful to the ANDZOA and GIZ for assistance in the choice of sampling sites and facilitation of contact with cooperative. Thanks are due to Women's Cooperative Tighanimine Filahia (Agadir), for Argan fruit processing. The authors are grateful to the staff of laboratory for chemical analysis especially Mr. M. Amakhmakh and the staff of laboratory of Agro-Food Technology and Quality (INRA-Marrakech).

References

- [1] F. Msanda, A. El Aboudi, and J.-P. Peltier, "Biodiversité et biogéographie de l'arganeraie marocaine," *Agric.*, vol. 14, no. 4, pp. 357–364, 2005.
- [2] S. Elgadi, A. Ouhammou, H. Zine, N. Maata, R. Ait Babahmad, and A. El Antari, "Comparative Oil Composition Study of the Endemic Moroccan Olive (*Olea europaea* subsp. *maroccana*) and Wild Olive (var. *Sylvestris*) in Central West Morocco," *J. Food Qual.*, 2021.
- [3] Z. Charrouf and D. Guillaume, "Argan oil, the 35-years-of-research product," *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, vol. 116, no. 10, pp. 1316–1321, 2014.
- [4] Z. Charrouf and D. Guillaume, "Argan oil: Occurrence, composition and impact on human health," *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, vol. 110, no. 7, pp. 632–636, 2008.
- [5] M. Jordan, A. Nayel, B. Brownlow, and T. Elbayoumi, "Development and evaluation of tocopherol-rich argan oil-based nanoemulsions as vehicles possessing anticancer activity," *J. Biomed. Nanotechnol.*, vol. 8, no. 6, pp. 944–956, 2012.
- [6] S. Gharby *et al.*, "Chemical and oxidative properties of olive and argan oils sold on the Moroccan market. A comparative study," *Med. J. Nutrition Metab.*, vol. 5, no. 1, pp. 31–38, 2012.
- [7] M. Hilali, Z. Charrouf, A. E. A. Soulhi, L. Hachimi, and D. Guillaume, "Detection of argan oil adulteration using quantitative campesterol GC-analysis," *JAOCS, J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 84, no. 8, pp. 761–764, 2007.
- [8] M. Dietrich *et al.*, "Does γ -Tocopherol Play a Role in the Primary Prevention of Heart Disease and Cancer? A Review," *J. Am. Coll. Nutr.*, no. October 2014, pp. 37–41, 2006.
- [9] L. Dugo *et al.*, "Determination of the Phenol and Tocopherol Content in Italian High-Quality Extra-Virgin Olive Oils by Using LC-MS and Multivariate Data Analysis," *Food Anal. Methods*, vol. 13, no. 5, pp. 1027–1041, 2020.
- [10] S. MARUBAYASHI, K. DOHI, K. SUGINO, and T. KAWAZAKI, "The Protective Effect of Administered α -Tocopherol against Hepatic Damage Caused by Ischemia-Reperfusion or Endotoxemia," *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 570, pp. 208–218, 1989.
- [11] A. El Abbassi, N. Khalid, H. Zbakh, and A. Ahmad, "Physicochemical Characteristics, Nutritional Properties, and Health Benefits of Argan Oil: A Review," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 54, no. 11, pp. 1401–1414, 2014.
- [12] A. Durazzo *et al.*, "Occurrence of tocopherols in foods: An updated shot of current databases," *J. Food Qual.*, vol. 2021, 2021.
- [13] A. Rueda *et al.*, "Combination of analytical and chemometric methods as a useful tool for the characterization of extra virgin argan oil and other edible virgin oils. Role of polyphenols and tocopherols," *J. AOAC Int.*, vol. 99, no. 2, pp. 489–494, 2016.
- [14] Y. El Kharrassi *et al.*, "Chemical and phytochemical characterizations of argan oil (*Argania spinosa* L. skeels), olive oil (*Olea europaea* L. cv. Moroccan picholine), cactus pear (*Opuntia megacantha* salm-dyck) seed oil and cactus cladode essential oil," *J. Food Meas. Charact.*, vol. 12, no. 2, pp. 747–754, 2018.
- [15] C. Cabrera-Vique, R. Marfil, R. Giménez, and O. Martínez-Augustin, "Bioactive compounds and nutritional significance of virgin argan oil - an edible oil with potential as a functional food," *Nutr. Rev.*, vol. 70, no. 5, pp. 266–279, 2012.
- [16] A. Delgado *et al.*, "Contribution of tocopherols to food sensorial properties, stability, and overall quality," *J. Food Qual.*, vol. 2020, no. December, 2020.
- [17] H. El Monfalouti, D. Guillaume, C. Denhez, and Z. Charrouf, "Therapeutic potential of argan oil: A review," *J. Pharm. Pharmacol.*, vol. 62, no. 12, pp. 1669–1675, 2010.
- [18] F. Khallouki *et al.*, "Consumption of argan oil (Morocco) with its unique profile of fatty acids, tocopherols, squalene, sterols and phenolic compounds should confer valuable cancer chemopreventive effects," *Eur. J. cancer Prev.*, vol. 12, no. 1, pp. 67–75, 2003.
- [19] A. Drissi *et al.*, "Evidence of hypolipemiant and antioxidant properties of argan oil derived from the argan tree (*Argania spinosa*)," *Clin. Nutr.*, vol. 23, no. 5, pp. 1159–1166, 2004.
- [20] SNIMA 08.5.090, "Service de Normalisation Industrielle Marocaine (SNIMA) Huiles d'argane," *Specif. Norme marocaine NM 08.5.090 Rabat*, 2003.
- [21] S. Gharby, H. Harhar, D. Guillaume, A. Haddad, and Z. Charrouf, "The origin of virgin argan

- oil's high oxidative stability unraveled," *Nat. Prod. Commun.*, vol. 7, no. 5, pp. 621–624, 2012.
- [22] R. Aithammou *et al.*, "Effect of clones, year of harvest and geographical origin of fruits on quality and chemical composition of Argan oil," *Food Chem.*, vol. 297, no. May, p. 124749, 2019.
- [23] M. Kharbach *et al.*, "Characterization and classification of PGI Moroccan Argan oils based on their FTIR fingerprints and chemical composition," *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 162, no. February, pp. 182–190, 2017.
- [24] P. Górnaś *et al.*, "Impact of Species and Variety on Concentrations of Minor Lipophilic Bioactive Compounds in Oils Recovered from Plum Kernels," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 64, no. 4, pp. 898–905, 2016.
- [25] M. Hilali, Z. Charrouf, A. E. A. Soulhi, L. Hachimi, and D. Guillaume, "Influence of origin and extraction method on argan oil physico-chemical characteristics and composition," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 53, no. 6, pp. 2081–2087, 2005.
- [26] S. Gharby, H. Harhar, D. Guillaume, A. Haddad, B. Matthäus, and Z. Charrouf, "Oxidative stability of edible argan oil: A two-year study," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 44, no. 1, pp. 1–8, 2011.
- [27] S. Gharby *et al.*, "Can fruit-form be a marker for Argan oil production?," *Nat. Prod. Commun.*, vol. 8, no. 1, pp. 25–28, 2013.
- [28] H. Harhar, S. Gharby, B. Kartah, D. Pioch, D. Guillaume, and Z. Charrouf, "Effect of harvest date of *Argania spinosa* fruits on Argan oil quality," *Ind. Crops Prod.*, vol. 56, pp. 156–159, 2014.
- [29] P. Górnaś, E. Radziejewska-Kubzdela, I. Mišina, R. Biegańska-Marecik, A. Grygier, and M. Rudzińska, "Tocopherols, Tocotrienols and Carotenoids in Kernel Oils Recovered from 15 Apricot (*Prunus armeniaca* L.) Genotypes," *JAOCs, J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 94, no. 5, pp. 693–699, 2017.
- [30] P. Górnaś, "Unique variability of tocopherol composition in various seed oils recovered from by-products of apple industry: Rapid and simple determination of all four homologues (α , β , γ and δ) by RP-HPLC/FLD," *Food Chem.*, vol. 172, pp. 129–134, 2015.
- [31] O. Pakhrou *et al.*, "Using two retrotransposon-based marker systems (SRAP and REMAP) for genetic diversity analysis of Moroccan argan tree," *Mol. Biol. Res. Commun.*, vol. 9, no. 3, pp. 93–103, 2020.
- [32] J.-P. Peltier, "Les séries de l'arganeraie steppique dans le Sous (Maroc)," *Ecol. Mediterr.*, vol. 9, no. 1, pp. 77–88, 1983.
- [33] F. M. B Fady, "Temperate and Mediterranean Forests," *Mediterr. For. Ecosyst.*, 2004.
- [34] M. F. Ramadan, "Healthy blends of high linoleic sunflower oil with selected cold pressed oils: Functionality, stability and antioxidative characteristics," *Ind. Crops Prod.*, vol. 43, no. 1, pp. 65–72, 2013.
- [35] "Argan Oil Market Size, Share & Trends Analysis Report by Type (Conventional, Organic), by Form (Absolute, Concentrate, Blend), by Application, by Distribution Channel, by Region, and Segment Forecasts, 2020–2027," 2021.
- [36] R. Consonni and L. R. Cagliani, "Nuclear Magnetic Resonance and Chemometrics to Assess Geographical Origin and Quality of Traditional Food Products," in *Advances in Food and Nutrition Research*, 2010, pp. 87–165.
- [37] S. Elgadi *et al.*, "Combination of Stable Isotopes and Fatty Acid Composition for Geographical Origin Discrimination of One Argan Oil Vintage," *Foods*, vol. 10, no. 6, pp. 1–13, 2021.
- [38] ISO 660, "Animal and vegetable fats and oils - Determination of acid value and acidity," *Polish Comm. Stand. Warsaw, Pol.*, 2009.
- [39] ISO 3656, "Animal and vegetable fats and oils - Determination of ultraviolet absorbance expressed as specific UV extinction," *Int. Organ. Stand.*, 2002.
- [40] ISO 3960, "Animal and Vegetable Fats and Oils-Determination of Peroxide Value-Iodometric (Visual) Endpoint Determination," *Int. Organ. Stand. BSI Stand. London, UK*, 2007.
- [41] ISO 659, "Oilseeds - Determination of oil content (Reference method)," *ISO*, 2009.
- [42] ISO 9936, "Animal and vegetable fats and oils - determination of tocopherols and tocotrienols contents - method using high performance liquid chromatography," pp. 1–10, 2016.
- [43] N. Ait Aabd, A. El Asbahani, Y. El Alem, A. El Finti, F. Msanda, and A. El Mousadik, "Variation

- in oil content and fatty acid composition in preselected argan trees with morphological characters and geographical localization,” *Med. J. Nutrition Metab.*, vol. 6, no. 3, pp. 217–225, 2013.
- [44] M. Lucarini *et al.*, *Cold pressed argan (Argania spinosa) oil*, Academic P., no. 2005. Elsevier Inc., 2020.
 - [45] C. Taribak, L. Casas, C. Mantell, Z. Elfadli, R. E. Metni, and E. J. Martínez De La Ossa, “Quality of cosmetic argan oil extracted by supercritical fluid extraction from *Argania spinosa* L.,” *J. Chem.*, vol. 2013, 2013.
 - [46] R. Marfil *et al.*, “Determination of polyphenols , tocopherols , and antioxidant capacity in virgin argan oil (*Argania spinosa* , Skeels),” *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, vol. 113, pp. 886–893, 2011.
 - [47] A. R. Abbasi, M. Hajirezaei, D. Hofius, U. Sonnewald, and L. M. Voll, “Specific roles of α - and γ -tocopherol in abiotic stress responses of transgenic tobacco,” *Plant Physiol.*, vol. 143, no. 4, pp. 1720–1738, 2007.
 - [48] S. E. Sattler, L. U. Gilliland, M. Magallanes-Lundback, M. Pollard, and D. DellaPenna, “Vitamin E is essential for seed longevity and for preventing lipid peroxidation during germination,” *Plant Cell*, vol. 16, no. 6, pp. 1419–1432, 2004.
 - [49] M. Hilali, H. El Monfalouti, and B. E. Kartah, “Evaluation of the chemical composition of argan (*Argania spinosa* L .) oil according to its extraction method , origin of production and altitude,” *Online J. Anim. Feed Res.*, vol. 10, no. 3, pp. 111–118, 2020.
 - [50] S. Gharby *et al.*, “Shelf-life of Moroccan prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) and argan (*Argania spinosa*) oils: A comparative study,” *Grasas y Aceites*, vol. 72, no. 1, pp. 1–9, 2021.
 - [51] D. Dolde, C. Vlahakis, and J. Hazebroek, “Tocopherols in breeding lines and effects of planting location, fatty acid composition, and temperature during development,” *JAOCS, J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 76, no. 3, pp. 349–355, 1999.
 - [52] Z. Zargoosh, M. Ghavam, G. Bacchetta, and A. Tavili, “Effects of ecological factors on the antioxidant potential and total phenol content of *Scrophularia striata* Boiss,” *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–15, 2019.
 - [53] M. Obranović *et al.*, “Influence of climate, variety and production process on tocopherols, plastoquinone-8 and pigments in flaxseed oil,” *Food Technol. Biotechnol.*, vol. 53, no. 4, pp. 496–504, 2015.
 - [54] R. Mafrica, A. Piscopo, A. De Bruno, and M. Poiana, “Effects of climate on fruit growth and development on olive oil quality in cultivar carolea,” *Agric.*, vol. 11, no. 2, pp. 1–18, 2021.
 - [55] M. Kharbach *et al.*, “Fatty-acid profiling vs UV-Visible fingerprints for geographical classification of Moroccan Argan oils,” *Food Control*, 2019.
 - [56] M. B. Miklavčič *et al.*, “Fatty Acid Composition of Cosmetic Argan Oil: Provenience and Authenticity Criteria,” *Molecules*, vol. 25, no. 18, 2020.

Chapitre 3

Combination of Stable Isotopes and Fatty Acid Composition for Geographical Origin Discrimination of One Argan Oil Vintage

Cet article a été publié en Mai 2021 dans la revue *FOODS* Web of Science-(IF-4,35)/Scopus-(SJR-0,73, Q1).

Sara Elgadi ^{1*}, Ahmed Ouhammou¹, Fouad Taous ², Hamza Zine ¹, Eleni G. Papazoglou ³, Tibari Elghali ², Nouredine Amenzou ², Hassan El Allali ⁴, Abderrahmane Aitlhaj ⁵ and Abderraouf El Antari ^{6*}

¹ Laboratory of Microbial Biotechnology, Agrosiences and Environment, Faculty of Sciences- Semlalia, Cadi Ayyad University, Marrakech 40000, Morocco; hamza.zine@edu.uca.ac.ma (H.Z.); ouhammou@uca.ac.ma (A.O.)

² National Center of Energy, Science and Nuclear Techniques, Rabat 10001, Morocco; taous@cnesten.org.ma (F.T.); elghali@cnesten.org.ma (T.E.); amenzou@cnesten.org.ma (N.A.)

³ Laboratory of Systematic Botany, Department of Crop Science, Agricultural University of Athens, 11855 Athens, Greece; elpapazo@aua.gr (E.G.P.)

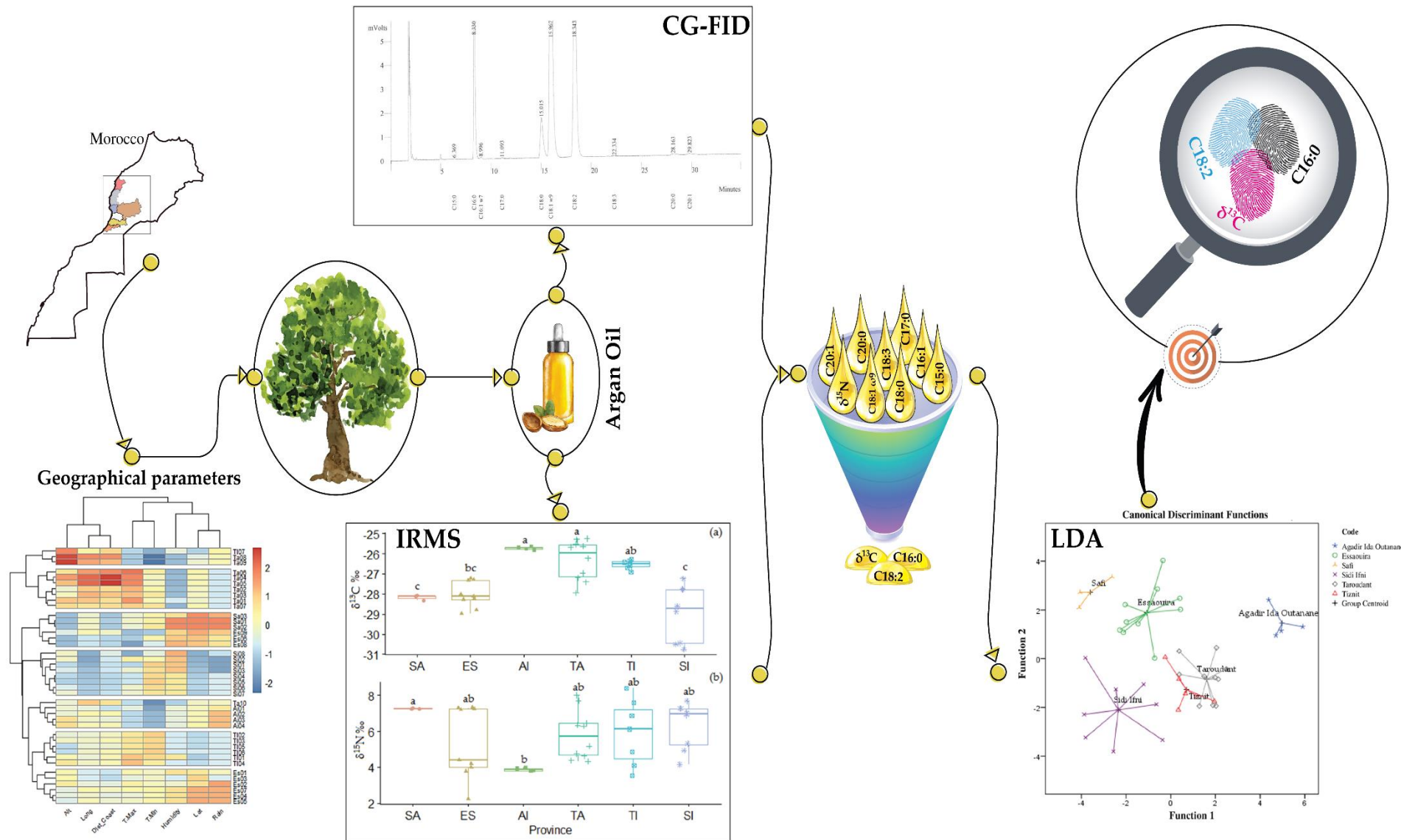
⁴ The Interprofessional Federation of the Argan Sector, Agadir 80000, Morocco; elallhas@gmail.com (H.E.)

⁵ National Agency for the Development of the Oasis and Argan Zones, Agadir 80000, Morocco; aithhaj.abderrahmane@gmail.com (A.A.)

⁶ Laboratory of Agro. Food Technology and Quality. Regional Center for Agronomic Research of Marrakech, National Institute of Agronomic Research (INRA), Marrakech 40000, Morocco; a_elantari@yahoo.fr (A.E.)

Ce troisième chapitre vient pour compléter le précédent (chapitre 2) par l'étude de la composition en acides gras et en isotopes stables de l'huile d'argane. En fait, les deux composants sont considérés comme des paramètres chimiques essentiels pour une prédiction fiable de l'origine géographique de l'huile d'argane. Des échantillons ont été collectés au niveau des arganeraies de centre-ouest de Maroc et analysés pour la détermination de leur composition en acides gras en isotopes stables.

Résumé graphique



Abstract

Quality control and traceability of Argan oil requires precise chemical characterization considering different provenances. The fatty acid profile is an essential parameter that certifies the quality and purity of Argan oil. In addition, stable isotopes were recently shown to be accurate as an indicator for geographical origin. In this study, fatty acid composition by gas chromatography (GC) and stable isotope ratio by isotope ratio mass spectrometry (IRMS) were investigated for classifying Argan oil according to its geographical origin. Forty-one Argan oil samples, belonging to six geographical origins of Moroccan natural Argan population (Safi, Essaouira, Agadir Ida Outanane, Taroudant, Tiznit and Sidi Ifni) were collected and extracted under the same conditions. The results show that the isotope $\delta^{13}\text{C}$, palmitic acid (C16:0), linoleic acid (C18:2) and unsaturated fatty acids (UFA) were strongly influenced by ecological parameters. Linear discriminant analysis (LDA) was performed to discriminate the six studied provenances. Discriminant models predicted the origin of Argan oil with 92.70% success. Samples from Safi, Essaouira and Agadir Ida Outanane presented the highest classification rate (100%). In contrast, the lowest rate was reported for samples from Tiznit (85.70%). The findings obtained for fatty acids and isotope combination might be considered as an accurate tool for determining the geographical origins of Argan oil. Moreover, they can potentially be used as specific markers for oils labeled with Protected Geographical Indication (PGI).

Keywords: argan oil; traceability; isotope and elemental techniques; fatty acids; environmental conditions; Morocco

I. Introduction

The Argan forest covers an area of 830,000 ha, occurring on the coastal and subcoastal areas of central-western Morocco (the fertile Souss Valley, Anti-Atlas and the coastal regions between Safi and Sidi Ifni) [1]. It was recognized in 1998 as a UNESCO biosphere reserve (Man and the Biosphere Reserve) [2]. This area presents a unique flora composed mainly of Mediterranean taxa, coexisting with tropical, Saharan, Macaronesian and endemic taxa [3,4]. Argan forests provide multiple services, such as carbon sequestration, species habitats, conservation of genetic diversity, a final barrier against desertification [1], prevention of soil erosion, and tourism [5]. The income generated from the Arganeraie Biosphere Reserve e.g., oil from the fruit of *Argania spinosa*, represents the principal source for many rural households [6].

Argan oil is rich in antioxidant compounds such as saponins and tocopherols [7], fatty acids [8], and sterols [9]. It has high nutritional characteristics and relevant medical properties that makes it valuable both in nutrition and cosmetic applications [10]. The variability of Argan oil composition can be attributed to many factors such as climate [11], fruit forms [12], fruit maturity [13], oil extraction method [14], and storage conditions [15]. Nevertheless, few studies have focused on the geographical origin and chemical composition relationship [16].

The global Argan oil market is estimated at more than 100 million USD (ANDZOA, 2021 personal communication) and is expected to grow at a revenue-based compound annual growth rate of 10.8% between 2020 and 2027 [17]. Such development requires more control to protect the consumer and the producer from fraud. In fact, several marketing and promotional strategies are aimed to relate food products to their geographical origin. European Union legislation, for example, allows the reservation of geographical designations for food products, such as Protected Designations of Origin (PDO) and Protected Geographical Indications (PGI) [18]. The identification of geographical origin increases consumer confidence in the quality of products. A growing demand was revealed for products that are correctly labeled and related to their geographical origin as local products [18].

Under the auspices of the Mohammed VI Foundation for the research and protection of the Argan tree, the Moroccan authorities have set up an internal mechanism for the protection of Argan forests. The aim was the constitution of a legal framework that protects the original products of the Argan tree and links the quality concept to the origin and the geographical indication. On 25 January 2010, Protected Geographical Indication was acquired, enabling the

designation ‘Argan Oil’, prepared according to well-defined methods [19], to be given exclusively to products from Central-West Morocco.

Many approaches have been used for the identification of geographical origin, such as fatty acid composition [20] and Fourier transform infrared fingerprinting [11] combined with chemometric tools as linear discriminant analysis (LDA) and partial least squares–discriminant analysis (PLS-DA) [21]. It was shown by Taous *et al.* [22] that the pedo-climatic parameters and the isotopic composition of argan oil are linked. The results reported by the same authors showed that it is possible to distinguish the production areas of Argan oil, as well as protect its quality and commercial value [22].

However, few studies have tried to develop models predictive of Argan oil origin based on stable isotope composition [22].

Isotopic analysis of the chemical elements of seed extract can help to understand different ecological processes (temperature, precipitation, air humidity) and their influence on the development and physiology of plants during the seed development period, the results generally allow the development of analytical tools to verify the origin of plant material [23]. Miklavčič *et al.* [20] reported that the fatty acid profile can be used as a tool for confirming the geographical origin of Argan oil. It was recommended as a method for laboratories due to its simplicity, rapidity, and efficiency. In addition, Taous *et al.* [22] confirmed that stable isotope assessment can provide accurate information on the origin of Argan oil. Consequently, the combination of determining fatty acids and stable isotopes can become a powerful tool for assessing the geographical traceability of Argan oil, in particular, considering its distribution area.

The aim of this study was to characterize the fatty acid profile, and stable isotope composition of Argan oil from six Moroccan provinces: Safi (for the first time), Essaouira, Agadir Ida Outanane, Taroudant, Tiznit and Sidi Ifni to compare the feasibility of combining fatty acid profiling and stable isotope ratio, associated with the chemometric technique LDA, to classify Argan oil according to its geographical origin.

II. Materials and Methods

II.1 Sampling Area and Plant Material

Argan fruits of natural populations were collected at full maturity from adult trees in six different geographical origins in the Central-West of Morocco from Safi in the North, and

Essaouira, Agadir Ida Outanane, Taroudant, Tiznit, and Sidi Ifni in the South (**Figure 1**). Therefore, the sampled area covered the entire Argan forest. This area is characterized by a semi-arid to arid bioclimate [3]. In addition, the dominant geological ages in the study area are Triassic, Jurassic, and Cretaceous [24]. Geographical parameters of samples were downloaded from Worldclim [25] and included in (**Table S1**). A total of 41 samples were collected between August and November 2018. After drying, 20 kg of fruit for each study point were depulped and crushed manually between two stones giving between 800 g and 1500 g of kernels for each sample. Kernels obtained were vacuum-sealed until extraction to avoid oxidation.

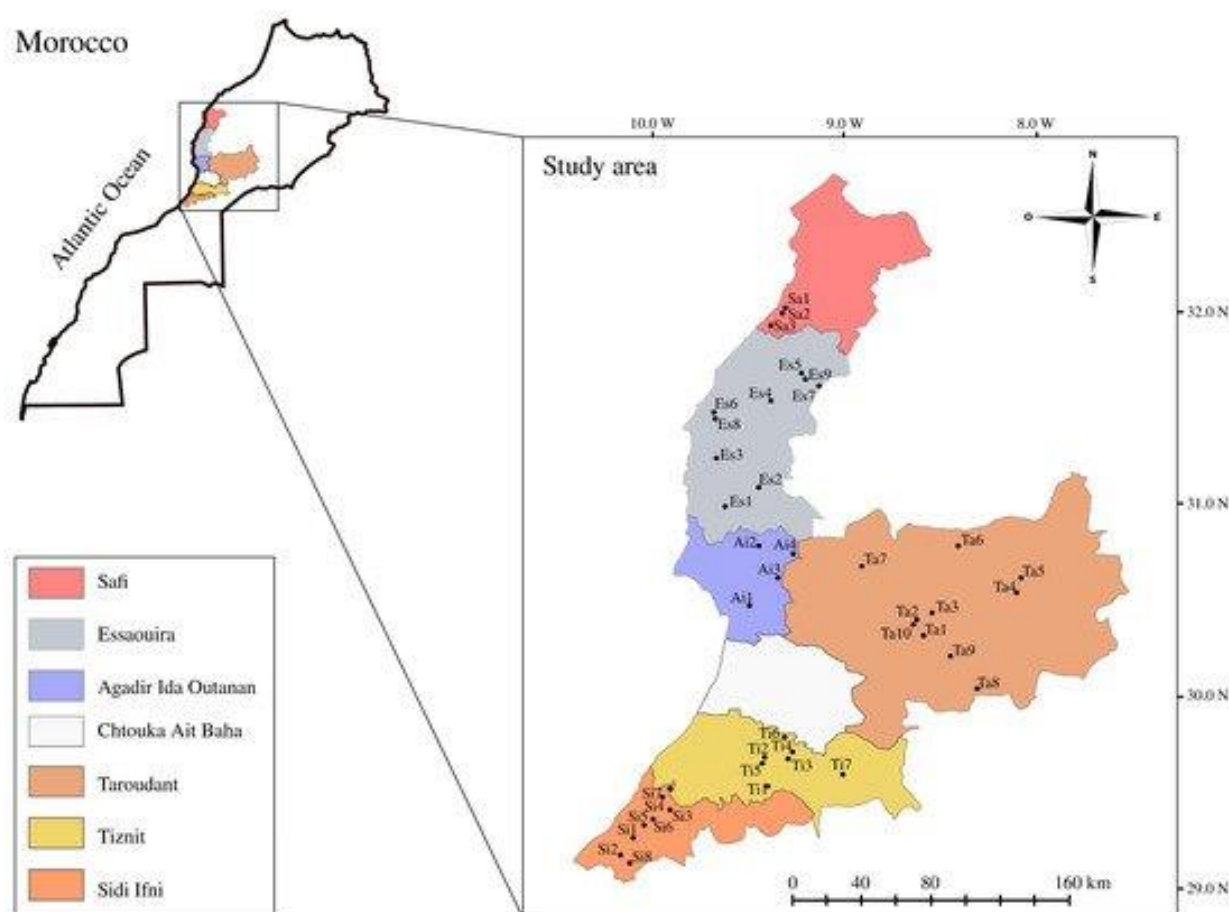


Figure 1. Sampling areas and localization of studied Argan samples.

II.2 Oil Extraction

Argan oil was mechanically extracted from unroasted kernels to maintain the natural composition using an oil press (Komet CA59G-IBG Monforts Oekotec). Then, oils were filtered and preserved in dark glass bottles of 250 mL, filled with nitrogen to avoid oxidation, in a refrigerator at +4 °C.

II.3 Chemical Composition

II.3.1 Fatty Acids

The determination of fatty acid composition was performed according to the European Union standard methods [26]. Argan oil (1 g) was mixed with 2 mL of petroleum ether and 3 mL of a methanolic potassium hydroxide solution (2 M). Methyl esters were analyzed by gas chromatography (CG, Varian CP 3380) equipped with a capillary column (CP-Wax 52 CB L = 30 m; Φ = 0.25 mm; $\varnothing$ = 0.20 μ m). The injector temperature was set at 220 °C, and the temperatures of the flame ionization detector (FID) and oven were maintained at 230 °C and 190 °C respectively, with nitrogen used as the carrier gas.

II.3.2 Stable Isotope Analysis

The carbon and nitrogen isotope composition ratios ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ respectively) of Argan oil samples (around 0.3 mg of oil) were determined via continuous flow EA-IRMS using an isotope ratio mass spectrometer (Delta V Thermo Scientific, Germany) coupled to an element analyzer (Thermo Scientific FLASH HT Plus) following the procedure described by Taous *et al.* [22].

The relative difference of isotope ratios (isotope-delta values) of a sample is reported according to the following formula [27]:

$$\delta^i \text{ E} = ({}^i \text{R}_{\text{SA}} - {}^i \text{R}_{\text{REF}}) / {}^i \text{R}_{\text{REF}} (1)$$

where i is the mass number of the heavier isotope of element E, R_{SA} is the respective isotope ratio of the sample and R_{REF} is the relevant internationally recognized reference material. The delta values were multiplied by 1000 and expressed in units “per mil” (‰). The isotopic $\delta^{15}\text{N}\text{‰}$ and $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ values of the samples were calibrated versus the following certified reference materials: fuel oil NBS-22 ($\delta^{13}\text{C}$ (‰) = -30.031 ± 0.043), benzoic acid IAEA-601 ($\delta^{13}\text{C}$ (‰) = $-28.81 \pm 0.04\text{‰}$) and Caffeine IAEA-600 ($\delta^{15}\text{N}$ (‰) = $+1 \pm 0.2\text{‰}$) (Provided to CNESTEN by IAEA under CRP N° D052040). Uncertainty per batch (7 replicates of secondary isotopic reference material) was $\leq 1.4\text{‰}$ for $\delta^{13}\text{C}$ and $\leq 0.7\text{‰}$ for $\delta^{15}\text{N}$.

II.4 Statistical Analysis

Statistical analysis was performed with SPSS Statistics version 21 (IBM Corp, Armonk, NY, USA). One-way ANOVA was carried out followed by Tukey as a post-hoc test to determine statistically significant differences between fatty acid and isotopic means for different provinces ($p < 0.05$). Furthermore, linear discriminant analysis (LDA) was applied for building predictive models by the combination of isotopic and fatty acid composition that maximize the discrimination of the predefined regions. The difference between means was

normalized by a measure of the within-class variability. In addition, to determine the chemical compounds responsible for determining the geographical origin according to discriminant functions, the statistical significance of each discriminant function was evaluated by Wilk's lambda. Heatmap and hierarchical clustering were assessed using Ward algorithm and Euclidean distance analysis to determine the relationship between samples according to their geographical parameters using R software version 3.6.2 (R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria).

III. Results and Discussion

III.1 Geographical Parameters

The hierarchical clustering analysis of geographical parameters and heatmap (**Figure 2**) confirmed that each province had specific ecological characteristics with some similarities between adjoining provinces. The first province, Taroudant (G1 and G2), was characterized by high altitude, easternmost longitude and furthest distance from the coast. These groups presented the most continental sampled province. Furthermore, the discrimination between G1 and G2 was also attributed to the differences recorded for both maximal and minimal temperatures. The second group included Safi and Essaouira and was classified based on the high levels of humidity due to their remarkable proximity to the ocean, precipitation and latitude. It represented the coastal sampled locations. The third group, Sidi Ifni, according to high values of minimal temperature and humidity, was considered to be affected by Macaronesian climatic influences. The fourth group, presented by Agadir Ida Outanane, was determined by its medium latitude and precipitation values. The province of Tiznit had medium maximal and minimal temperature values. The last group (6) included the continental sampled locations of Essaouira, which is characterized by a high latitude and precipitation. It should be noted that Ti7 (Tiznit) presents some similarities to Taroudant province (group 1). Furthermore, Ta10 (Taroudant) was classified with those of Agadir Ida Outanane province. The similarities were normal due to the small distances between these provinces.

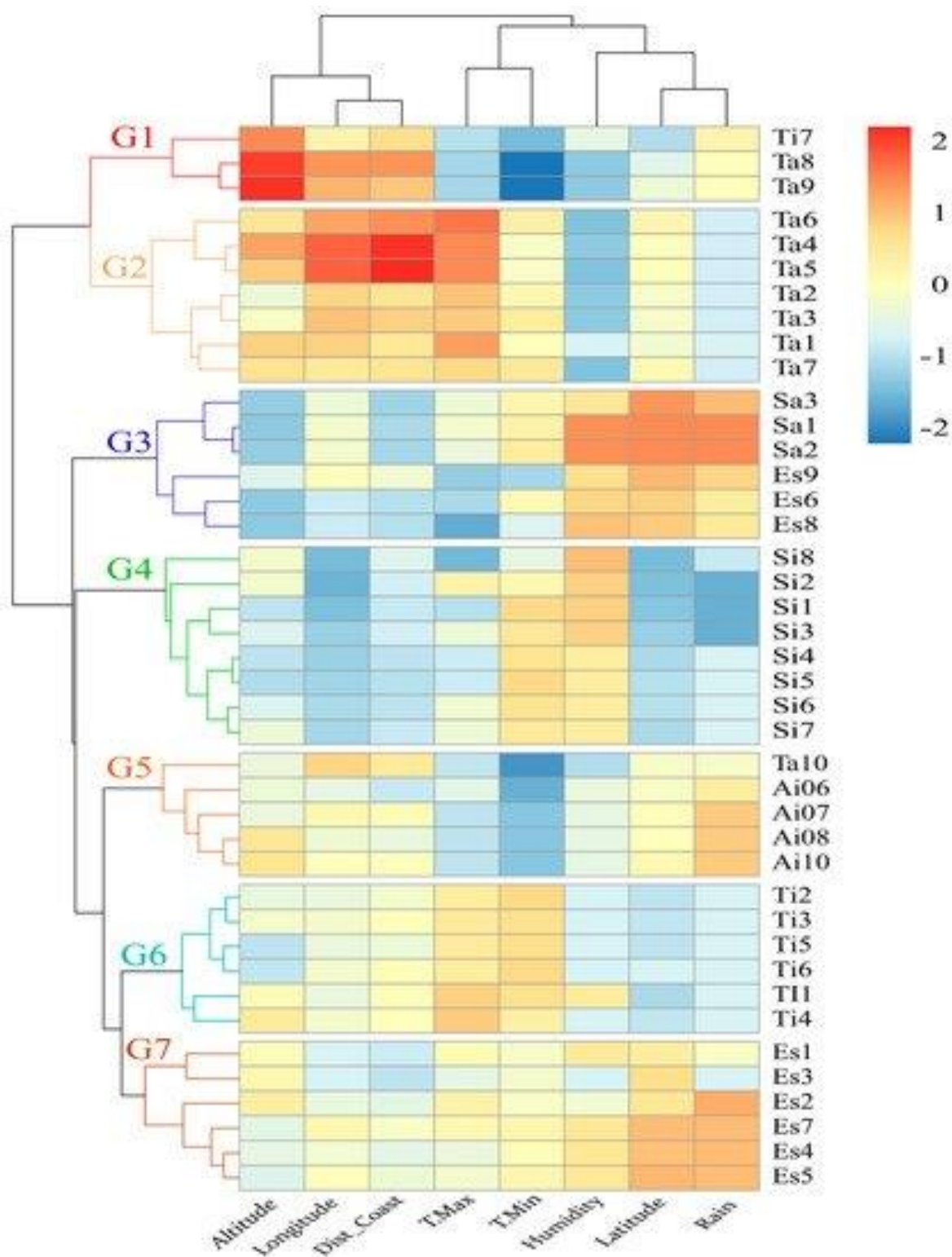


Figure 2. Hierarchical clustering and heatmap of geographical parameters of each sampled location. The rows in the heatmap represent the sampled locations, Safi (Sa), Essaouira (Es), Agadir Ida Outanane (Ai), Taroudant (Ta), Tiznit (Ti) and Sidi Ifni (Si) and the columns indicate geographical parameters, altitude, longitude, distance from the coast (Dist-coast), maximal temperature (T.Max), minimal temperature (T.Min), humidity, latitude and rain. Red and orange cells indicate a higher value for the corresponding geographical parameter and blue cells indicate low values.

III.2 Chemical Composition

III.2.1 Fatty Acids

As shown in (**Table 1** and **Figure 3**), oleic acid was the predominant fatty acid in Argan oil (44.75–48.87%), followed by linoleic acid (29.19–35.23%) and palmitic acid (13.83–14.98%). According to ANOVA followed by Tukey's test, significant differences between samples from different provinces ($p < 0.05$) were revealed for all studied fatty acids except arachidic acid (C20:0). These results agree with existing studies on unroasted Argan kernels mechanically pressed [**16**]. The highest oleic acid (C18:1) levels were noted in samples from Agadir Ida Outanane and Taroudant, at 48.87% and 48.80%, respectively. The results of Taroudant are in accordance with findings reported by Kharbach *et al.* [**11**] for the same locality.

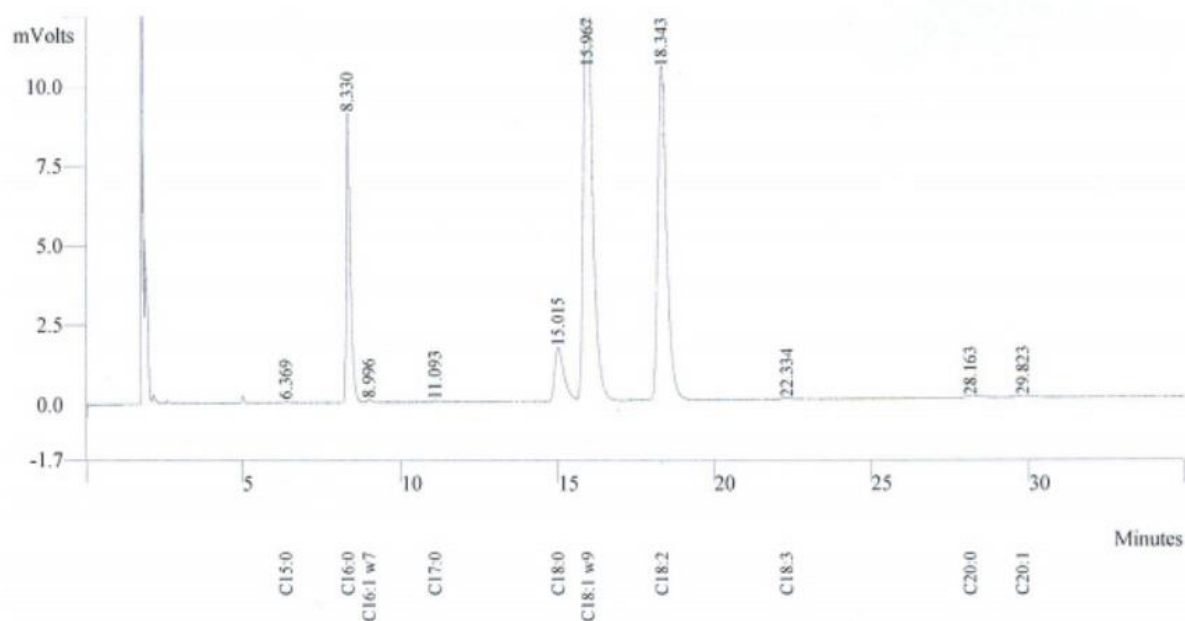


Figure 3. Chromatogram (GC-FID) of fatty acid methyl esters of an Argan oil sample.

Table 1. Fatty acid composition of Argan oils from different geographical origins.

		Safi (N=3)	Essaouira (N=9)	Agadir Ida Outanane (N=4)	Taroudant (N=10)	Tiznit (N=7)	Sidi Ifni (N=8)	EVAO (SNIMA, 2003)
Pentadecylic acid	C15:0*	0.06±0.01 ^b	0.06±0.01 ^{ab}	0.05±0.01 ^a	0.05±0.01 ^{ab}	0.05±0.01 ^{ab}	0.05±0.01 ^a	≤0.2%
Palmitic acid	C16:0***	13.83±0.64 ^a	14.50±0.61 ^{ab}	13.93±0.05 ^a	15.85±0.89 ^c	15.36±0.61 ^{bc}	14.98±0.46 ^{abc}	11.5-15%
Palmitoleic acid	C16:1**	0.10±0.01 ^{ab}	0.10±0.02 ^{ab}	0.09±0.01 ^a	0.11±0.01 ^{ab}	0.10±0.01 ^{ab}	0.12±0.01 ^b	
Margaric acid	C17:0**	0.09±0.03 ^b	0.07±0.02 ^b	0.01±0.01 ^a	0.06±0.02 ^b	0.06±0.02 ^b	0.04±0.03 ^{ab}	
Stearic acid	C18:0*	5.65±0.42 ^a	5.32±0.60 ^a	5.39±0.09 ^a	5.68±0.81 ^a	6.31±0.45 ^a	5.69±0.31 ^a	4.3-7.2%
Oleic acid	C18:1 ω9*	44.75±0.06 ^a	46.67 ±1.98 ^{ab}	48.87±0.06 ^b	48.80±2.06 ^b	46.17±3.14 ^{ab}	46.73±1.74 ^{ab}	43.1-49%
Linoleic acid	C18:2**	35.23±0.02 ^b	32.84±1.45 ^{ab}	31.45±0.06 ^{ab}	29.19±2.42 ^a	31.40±3.35 ^{ab}	32.12±1.86 ^{ab}	29.3-36%
Linolenic acid	C18:3***	0.13±0.04 ^c	0.06±0.02 ^b	0.00±0.00 ^a	0.06±0.03 ^b	0.09±0.03 ^{bc}	0.05±0.04 ^{ab}	≤0.3%
Arachidic acid	C20:0 ^{NS}	0.09±0.08 ^{ab}	0.17±0.10 ^{ab}	0.03±0.06 ^a	0.17±0.11 ^{ab}	0.23±0.10 ^b	0.12±0.10 ^{ab}	≤0.5%
Gadoleic acid	C20:1*	0.1±0.09 ^{ab}	0.24±0.11 ^b	0.04±0.08 ^a	0.18±0.12 ^{ab}	0.21±0.09 ^{ab}	0.12±0.08 ^{ab}	≤0.5%
Unsaturated fatty acid	UFA***	80.32±0.15 ^c	79.93±0.98 ^{bc}	80.45±0.07 ^c	78.36±1.44 ^{ab}	77.98±0.81 ^a	79.16±0.63 ^{abc}	
Saturated fatty acid	SFA***	19.74±0.18 ^a	20.13±0.96 ^{ab}	19.42±0.11 ^a	21.83±1.35 ^{bc}	22.03±0.66 ^c	20.90±0.69 ^{abc}	

Values are expressed as mean ± SD. Different letters in the same line designate significant differences ($p < 0.05$). NS=not significant. * $P < 0.05$. ** $P < 0.01$. *** $P < 0.001$. UFA: Unsaturated fatty acid. SFA: Saturated fatty acid.

Linoleic acid (C18:2) content was high in samples from Safi (35.23%) followed by those from Essaouira (32.84%) and Sidi Ifni (32.12%). These provinces represent the coastal sources of Argan oil. Furthermore, a high percentage of linoleic acid can be used as a marker of coastal Argan oil. Similar results were confirmed by Aithammou *et al.* [16] and Kharbach *et al.* [11] for Essaouira. In addition, our results confirmed the high positive correlation also reported by Ait Aabd *et al.* [10] between linoleic acid and longitude. Samples from Taroudant and Tiznit presented the highest values of palmitic acid, 15.85% and 15.36%, respectively. As previously described, these provinces represented the continental Argan oil, allowing us to consider palmitic acid as a marker of continental Argan oil. Similarly to Kharbach *et al.* [11] palmitic acid (C16:0) levels increased from the plain (low altitude) to the highlands (high altitude). All values were within the limits established by the SNIMA 08.5.090 standard [28]. Unsaturated fatty acids were eminently high in Argan oils and ranged between 77.98% and 80.45%, while saturated fatty acid contents were lower and varied between 19.42% and 22.03%.

The results show that the difference of palmitic acid (C16:0), linolenic acid (C18:3), unsaturated fatty acid (UFA) and saturated fatty acid (SFA) between provinces was highly significant ($p < 0.001$) and might be used as markers for the identification geographical origin.

III.2.2 Isotopic Composition

Stable isotopes ratios $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in Argan oil from six regions (provinces) are shown in (Figure 4 and Table S2). $\delta^{13}\text{C}$ values ranged between -30.7‰ and -25.2‰ . However, $\delta^{15}\text{N}$ levels were between 0.86‰ and 8.40‰ . Taous *et al.* [22] reported that $\delta^{13}\text{C}$ ratio varied between -29.9‰ and -26.3‰ in Argan oil, which is in agreement with our results. Concerning the $\delta^{15}\text{N}$ ratio, the same authors provided values ranging from $+3.1\text{‰}$ to $+7.7\text{‰}$ for Argan kernels.

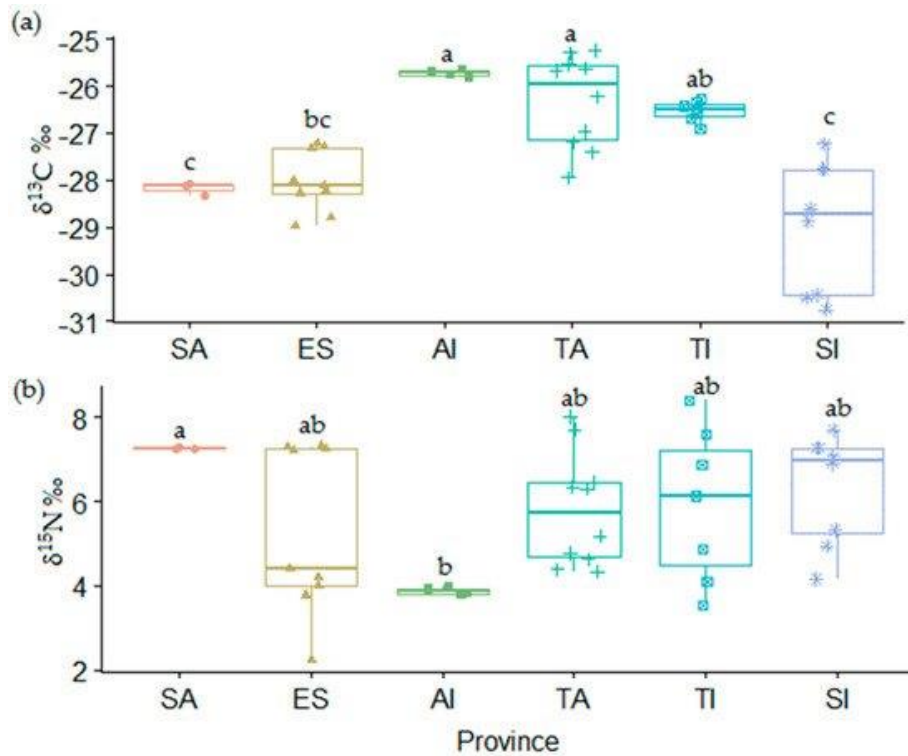


Figure 4. Boxplot of (a) $\delta^{13}\text{C}$ and (b) $\delta^{15}\text{N}$ in Argan oil samples collected in different provinces (Safi (SA), Agadir Ida Outanane (AI), Essaouira (ES), Sidi Ifni (SI), Taroudant (TA) and Tiznit (TI)). Significant differences ($p < 0.05$) were expressed by different letters.

According to ANOVA followed by Tukey's test, significant differences between samples from different provinces ($p < 0.05$) were highly revealed for $\delta^{13}\text{C}$. Taroudant, Agadir Ida Outanane and Tiznit presented the highest mean values of $\delta^{13}\text{C}$, whilst Essaouira, Safi and Sidi Ifni presented much lower means. Similar values were reported for Essaouira (-27.9‰ to -29.9‰) [22]. In sum, high levels of $\delta^{13}\text{C}$ can be used as isotopic marker of continental regions. This finding was supported by the result obtained by Taous *et al.* [22].

The province of Safi presented the highest level of $\delta^{15}\text{N}$. In addition, the mean $\delta^{15}\text{N}$ did not differ significantly between Essaouira, Sidi Ifni, Taroudant and Tiznit. The lowest level was shown for samples from Agadir Ida Outanane. According to ANOVA test, $\delta^{15}\text{N}$ in Argan oils may not be appropriate for the identification of geographical origin. The obtained results were

consistent with the findings of Taous *et al.* [22], and with those of Portarena *et al.* [29] for olive oil.

III.2.3 Relation between Ecological Parameters and Argan Oil Composition

The results of Pearson correlation analysis (**Table 2**) showed that $\delta^{13}\text{C}$, C16:0, C18:2, UFA and SFA were correlated with the majority of geographical parameters. The amount of $\delta^{13}\text{C}$ was affected by longitude, altitude, minimal temperature, humidity and distance from the coast. However, latitude, maximal temperature, and precipitation had no significant relationship with the $\delta^{13}\text{C}$ level. The negative correlation of $\delta^{13}\text{C}$ with humidity might be related to the fact that a high humidity allows stomata to stay open for longer time, facilitating a high passage of CO_2 inside the leaves and leading to a high accumulation of ^{13}C in Argan fruit [30]. $\delta^{15}\text{N}$ had no correlation with geographical parameters. These results are in line with a previous study on stable isotopes [22]. Palmitic acid (C16:0) percentage was positively correlated with the maximal temperature and the distance from the coast. Furthermore, its negative correlation with humidity was revealed. Linoleic acid content (C18:2) was negatively correlated with altitude and the distance from the coast; in contrast, it was positively correlated with humidity. Oleic acid content (C18:1 ω 9) was significantly positively correlated ($p < 0.01$) with altitude. Unsaturated fatty acid (UFA) had a positive correlation with latitude; however, a negative correlation was highlighted with longitude and altitude. Ait Aabd *et al.* [10] reported that Argan oil unsaturated fatty acid content was affected by altitude, latitude and longitude, which our results are consistent with. A similar conclusion was also drawn by Kharbach *et al.* [31].

Table 2. Correlation of stable isotope ratios and fatty acid contents of Argan oil from six provenances with geographical parameters.

	Latitude	Longitude	Altitude	T Max	T Min	Precipitation	Humidity	Distance from Coast
$\delta^{13}\text{C}_{\text{‰}}$	0.01	0.64 ***	0.64 ***	0.26	-0.45 **	0.09	-0.68 ***	0.65 ***
$\delta^{15}\text{N}_{\text{‰}}$	-0.03	-0.10	-0.28	0.07	0.18	-0.10	0.19	-0.12
C15:0	0.49 **	0.13	-0.18	0.08	0.01	0.27	0.12	-0.06
C16:0	-0.38 *	0.43 **	0.41 **	0.54 ***	0.19	-0.49 **	-0.54 ***	0.60 ***
C16:1	-0.38 *	-0.14	-0.07	0.17	0.33 *	-0.47 **	0.02	-0.01
C17:0	0.27	0.15	0.03	0.10	0.05	0.15	0.13	0.09
C18:0	-0.29	0.03	0.04	0.24	0.21	-0.24	-0.13	0.16
C18:1 ω 9	-0.09	0.29	0.41 **	0.16	-0.25	-0.16	-0.93 *	0.31 *
C18:2	0.28	-0.42 **	-0.52 ***	-0.37 *	0.13	0.35 *	0.56 ***	-0.53 ***
C18:3	0.13	0.01	-0.12	0.08	0.15	0.02	0.07	-0.06
C20:0	-0.04	0.15	-0.03	0.19	0.17	-0.13	-0.26	0.18
C20:1	0.14	0.18	-0.01	0.13	0.10	0.03	-0.16	0.16
UFA	0.43 **	-0.32 *	-0.33 *	-0.45 **	-0.17	0.43 **	0.44 **	-0.52 **
SFA	-0.43 **	0.32 *	0.33 *	0.45 **	0.17	-0.43 **	-0.44 **	0.52 **

Correlation significant at: *** $p = 0.001$, ** $p = 0.01$, * $p = 0.05$. UFA: Unsaturated fatty acid; SFA: saturated fatty acid.

III.2.4 Linear Discriminant Analysis (LDA)

LDA is a supervised method that focuses on maximizing the separability among known categories by creating a new linear axis. In contrast to the PCA, (unsupervised method) groups of objects were predefined. PCA aims to find components that account for maximum variance in the data without taking into account class membership, and is used especially when such information is not available [32]. In our case, the categories (provenances) were known. LDA was performed based on fatty acid and stable isotope combination in order to create discriminant models regarding the geographical origin classification of Argan oils. **Figure 4** shows the LDA scatter plot for Argan oils from six provinces. Five discriminant functions were constructed based on Wilks' lambda values, which explained 100% of the variance (**Table S3**); 50.94% of the total variance was explained by function 1, 27.09% explained by function 2, 14.65% explained by function 3, 5.12% explained by function 4 and 2.18% explained by function 5. The Wilks' lambda values (**Table 3**) for the functions 1, 2, 3, 4 and 5 were 0.005, 0.039, 0.170, 0.479 and 0.786, respectively, with *p*-values 0.0001, 0.0001, 0.004, 0.199 and 0.486. **Table S3** shows the degree of association between chemical composition and the discriminant functions. The first three functions have a high discriminant power. The LDA showed good predictive ability for classification of the geographical origin of Argan oil from the six provinces (**Figure 5**). The overlap between Taroudant and Tiznit is explained by the geographical similarities previously detected as shown in (**Figure 2**).

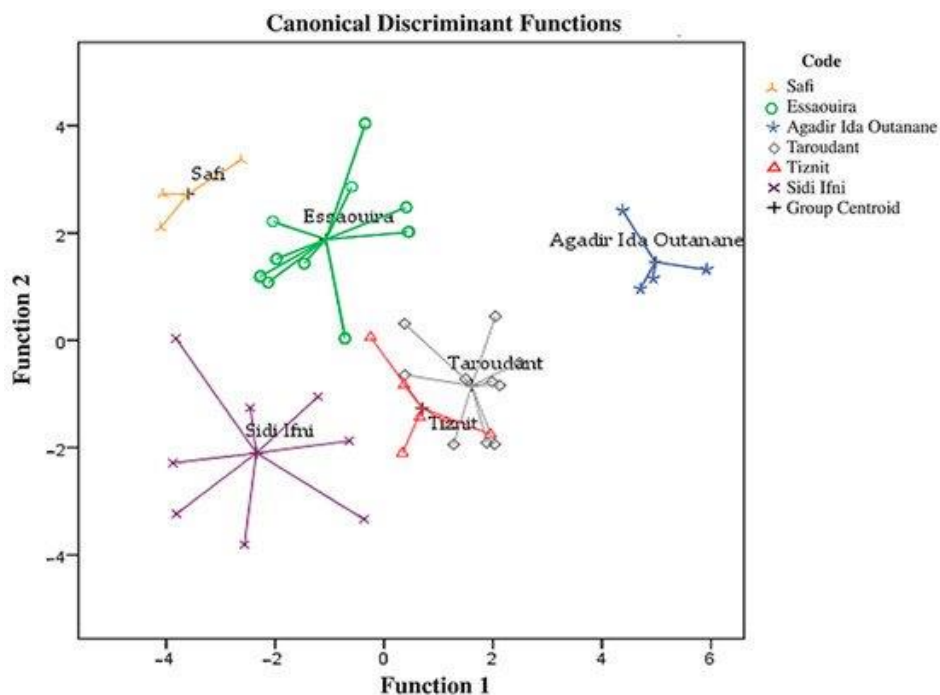


Figure 5. Linear discriminant analysis performed based on a combination of isotopic and fatty acid composition of Argan oil samples from six provinces.

Table 3. Discriminant functions elaborated based on the combination of stable isotope ratios and fatty acid composition.

Functions	Wilks' Lambda	p-Value
Function 1 = $6.86 + 1.08 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{‰}} + 0.15 \times \delta^{15}\text{N}_{\text{‰}} + 19.59 \times \text{C15:0} + 0.75 \times \text{C16:0} - 54.14 \times \text{C16:1} - 30.30 \times \text{C17:0} - 0.36 \times \text{C18:0} + 0.31 \times \text{C18:1} + 0.18 \times \text{C18:2} - 24.36 \times \text{C18:3} + 9.38 \times \text{C20:0} - 6.94 \times \text{C20:1}$	0.005	0.000
Function 2 = $14.11 - 0.60 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{‰}} + 0.77 \times \delta^{15}\text{N}_{\text{‰}} + 96.07 \times \text{C15:0} - 1.08 \times \text{C16:0} - 17.54 \times \text{C16:1} + 3.24 \times \text{C17:0} + 0.79 \times \text{C18:0} - 0.12 \times \text{C18:1} - 0.25 \times \text{C18:2} + 3.34 \times \text{C18:3} - 14.91 \times \text{C20:0} + 14.02 \times \text{C20:1}$	0.038	0.000
Function 3 = $-101.19 + 0.01 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{‰}} - 0.01 \times \delta^{15}\text{N}_{\text{‰}} + 32.66 \times \text{C15:0} + 2.09 \times \text{C16:0} - 35.76 \times \text{C16:1} + 15.14 \times \text{C17:0} + 0.02 \times \text{C18:0} + 0.93 \times \text{C18:1} + 0.79 \times \text{C18:2} + 11.33 \times \text{C18:3} - 0.73 \times \text{C20:0} + 3.99 \times \text{C20:1}$	0.169	0.004
Function 4 = $-48.29 + 0.67 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{‰}} + 0.24 \times \delta^{15}\text{N}_{\text{‰}} + 55.88 \times \text{C15:0} - 0.33 \times \text{C16:0} + 31.28 \times \text{C16:1} - 16.05 \times \text{C17:0} + 1.45 \times \text{C18:0} - 0.54 \times \text{C18:1} + 0.63 \times \text{C18:2} + 22.23 \times \text{C18:3} - 4.98 \times \text{C20:0} - 1.94 \times \text{C20:1}$	0.479	0.199
Function 5 = $-153.08 - 0.04 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{‰}} + 0.29 \times \delta^{15}\text{N}_{\text{‰}} - 21.85 \times \text{C15:0} + 1.92 \times \text{C16:0} - 13.57 \times \text{C16:1} + 7.81 \times \text{C17:0} + 0.24 \times \text{C18:0} + 1.57 \times \text{C18:1} + 1.53 \times \text{C18:2} - 1.66 \times \text{C18:3} - 2.80 \times \text{C20:0} + 0.35 \times \text{C20:1}$	0.785	0.486

Discriminant models allowed prediction of the geographical origin of 92.70% of the Argan oil samples (**Table 4**). Safi, Essaouira and Agadir Ida Outanane presented the highest classification rate (100%), followed by Taroudant (90%), Sidi Ifni (87.5%) and Tiznit (85.7%). According to results obtained by Miklavčič *et al.* [20] using Orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) based on fatty acid profiling, the classification rate varied between 82% and 100%, which was similar to the predictive ability obtained using LDA models (85.7–100%). It also confirms that using a combination of fatty acids and isotope ratios can generate models with high predictive ability. In contrast, Kharbach *et al.* [11] reported that models built from the chemical composition are not the best for prediction of geographical origin. Nonetheless, samples extracted under different conditions can influence the chemical composition [33]. Therefore, samples extracted under the same conditions are highly recommended to build accurate models with a good predictive ability. LDA is one of the important techniques for dimensionality reduction. However, the LDA has negative aspects such as sensitivity to outliers [34], a linearity problem (equality of averages) [32], and a small sample size which may lead to low robustness and efficiency of one vintage.

Table 4. Performance of the LDA model for prediction of origin of Argan oil from the six provinces.

Province of Origin	Predicted Origin					
	Agadir Ida Out- anane	Essaouira	Safi	Sidi Ifni	Taroudant	Tiznit
Agadir Ida Outanane	4 (100%)	0	0	0	0	0
Essaouira	0	9 (100%)	0	0	0	0
Safi	0	0	3 (100%)	0	0	0
Sidi Ifni	0	0	1 (12.5%)	7 (87.5%)	0	0
Taroudant	0	0	0	0	9 (90%)	1 (10%)
Tiznit	0	0	0	0	1 (14.3%)	6 (85.7%)

IV. Conclusions

The combination of fatty acid and stable isotope content, coupled with multivariate analyses, such as LDA, was implemented in order to classify Argan oil from six main geographical origins of the natural Argan tree population. The LDA models provided good predictions and were able to discriminate accurately between 92.70% of samples. The combination of fatty acid and stable isotope profiles is a very promising tool for enhancing the Protected Geographical Indication label. Stable isotopes, especially $\delta^{13}\text{C}$, and fatty acids C16:0, C18:2, unsaturated and saturated fatty acids, showed good relationships with the geographical parameters. Therefore, these can be considered as accurate geographical markers. Further improvement by increasing the number of samples from different production years and considering other purity parameters is recommended for refining and strengthening the models predictive of geographic origin.

Supplementary Materials

The following are available online at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/foods10061274/s1>, Table S1: geographical parameters of six sampled provinces of Argan trees. Table S2: isotopes and fatty acid composition of argan oils from six provenances. Table S3: canonical discriminant function coefficients with classification parameters.

Author Contributions

Conceptualization, A.O., A.E.A. and F.T.; methodology, S.E., A.O., A.E.A., F.T. and T.E.; software, S.E. and H.Z.; validation, E.G.P., A.O., A.E.A., F.T., N.A. and A.A.; formal analysis,

S.E.; investigation, A.A., H.E.A. and A.E.A.; resources, A.O., A.E.A. and N.A.; data curation, S.E.; writing—original draft preparation, S.E.; writing—review and editing, S.E.; supervision, A.O. and A.E.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

The APC was funded by Regional Center for Agronomic Research of Marrakech, National Institute of Agronomic Research (INRA) and Agricultural University of Athens.

References

1. Msanda, F.; Mayad, E.H.; Furze, J.N. Floristic biodiversity, biogeographical significance, and importance of Morocco's Arganeraie Biosphere Reserve. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2021**, 1–10.
2. Charrouf, Z.; Guillaume, D. Argan oil, the 35-years-of-research product. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* **2014**, *116*, 1316–1321.
3. Msanda, F.; El Aboudi, A.; Peltier, J.-P. Biodiversité et biogéographie de l'arganeraie marocaine. *Agriculture.* **2005**, *14*, 357–364.
4. Elgadi, S.; Ouhammou, A.; Zine, H.; Maata, N.; Ait Babahmad, R.; El Antari, A. Comparative Oil Composition Study of the Endemic Moroccan Olive (*Olea europaea* subsp. *maroccana*) and Wild Olive (var. *Sylvestris*) in Central West Morocco. *J. Food Qual.* **2021**, *2021*, 8869060.
5. Karmaoui, A. Ecosystem Services of the Argan Forest, the Current State and Trends. *Adv. Res.* **2016**, *8*, 1–13.
6. Charrouf, Z.; Guillaume, D. Argan oil, functional food, and the sustainable development of the argan forest. *Nat. Prod. Commun.* **2008**, *3*, 283–288.
7. Jordan, M.; Nayel, A.; Brownlow, B.; Elbayoumi, T. Development and evaluation of tocopherol-rich argan oil-based nanoemulsions as vehicles possessing anticancer activity. *J. Biomed. Nanotechnol.* **2012**, *8*, 944–956.
8. Gharby, S.; Harhar, H.; El Monfalouti, H.; Kartah, B.; Maata, N.; Guillaume, D.; Charrouf, Z. Chemical and oxidative properties of olive and argan oils sold on the Moroccan market. A comparative study. *Med. J. Nutrition Metab.* **2012**, *5*, 31–38.
9. Hilali, M.; Charrouf, Z.; Soulhi, A.E.A.; Hachimi, L.; Guillaume, D. Detection of argan oil adulteration using quantitative campesterol GC-analysis. *JAOCs J. Am. Oil Chem. Soc.* **2007**, *84*, 761–764.
10. Ait Aabd, N.; El Asbahani, A.; El Alem, Y.; El Finti, A.; Msanda, F.; El Mousadik, A. Variation in oil content and fatty acid composition in preselected argan trees with morphological characters and geographical localization. *Mediterr. J. Nutr. Metab.* **2013**, *6*, 217–225.
11. Kharbach, M.; Kamal, R.; Bousrabat, M.; Alaoui Mansouri, M.; Barra, I.; Alaoui, K.; Cherrah, Y.; Vander Heyden, Y.; Bouklouze, A. Characterization and classification of PGI Moroccan Argan oils based on their FTIR fingerprints and chemical composition. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* **2017**, *162*, 182–190.
12. Gharby, S.; Harhar, H.; Kartah, B.E.; El Monfalouti, H.; Denhez, C.; Hilali, M.; Guillaume, D.; Charrouf, Z. Can fruit-form be a marker for Argan oil production? *Nat. Prod. Commun.* **2013**, *8*, 25–28.
13. Harhar, H.; Gharby, S.; Kartah, B.; Pioch, D.; Guillaume, D.; Charrouf, Z. Effect of harvest date of *Argania spinosa* fruits on Argan oil quality. *Ind. Crops Prod.* **2014**, *56*, 156–159.

14. Hilali, M.; Charrouf, Z.; Soulhi, A.E.A.; Hachimi, L.; Guillaume, D. Influence of origin and extraction method on argan oil physico-chemical characteristics and composition. *J. Agric. Food Chem.* **2005**, *53*, 2081–2087.
15. Gharby, S.; Harhar, H.; Guillaume, D.; Haddad, A.; Matthäus, B.; Charrouf, Z. Oxidative stability of edible argan oil: A two-year study. *LWT-Food Sci. Technol.* **2011**, *44*, 1–8.
16. Aithammou, R.; Harrouni, C.; Aboudlou, L.; Hallouti, A.; Mlouk, M.; Elsbahani, A.; Daoud, S. Effect of clones, year of harvest and geographical origin of fruits on quality and chemical composition of Argan oil. *Food Chem.* **2019**, *297*, 124749.
17. Argan Oil Market Size, Share & Trends Analysis Report by Type (Conventional, Organic), by Form (Absolute, Concentrate, Blend), by Application, by Distribution Channel, by Region, and Segment Forecasts, 2020–2027, Report ID: 978-1-68038-671-4. 2020. Available online: <https://www.grandviewresearch.com/industryanalysis/argan-oil-market> (accessed on 3 March 2021).
18. Consonni, R.; Cagliani, L.R. Nuclear Magnetic Resonance and Chemometrics to Assess Geographical Origin and Quality of Traditional Food Products. *Adv. Food Nutr. Res.* **2010**, *59*, 87–165.
19. Romagny, B. The pgi argan between patrimonial and commercialization resources. *Maghreb-Machrek* **2009**, *4*, 85–114.
20. Miklavčič, M.B.; Taous, F.; Valenčič, V.; Elghali, T.; Podgornik, M.; Strojnik, L.; Ogrinc, N. Fatty Acid Composition of Cosmetic Argan Oil: Provenience and Authenticity Criteria. *Molecules* **2020**, *25*, 4080.
21. Kharbach, M.; Marmouzi, I.; El Jemli, M.; Bouklouze, A.; Vander Heyden, Y. Recent advances in untargeted and targeted approaches applied in herbal-extracts and essential-oils fingerprinting—A review. *J. Pharm. Biomed. Anal.* **2020**, *177*, 112849.
22. Taous, F.; Amenzou, N.; Marah, H.; Maia, R.; Maguas, C.; Bahmad, L.; Kelly, S. Stable isotope ratio analysis as a new tool to trace the geographical origin of Argan oils in Morocco. *Forensic Chem.* **2020**, *17*, 100198.
23. Kelly, S.; Heaton, K.; Hoogewerff, J. Tracing the geographical origin of food: The application of multi-element and multi-isotope analysis. *Trends Food Sci. Technol.* **2005**, *16*, 555–567.
24. Piqué, A.; Soulaïmani, A.; Hoepffner, C.; Bouabdelli, M.; Laville, E.; Amrhar, M.; Chalouan, A. “Géologie du Maroc” (Nouvelle Edition); Géode Editions: Marrakech, Maroc, 2007; 287p.
25. Fick, S.E.; Hijmans, R.J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* **2017**, *37*, 4302–4315.
26. Regulation, H. Commission Regulation (EEC) No. 2568/91 of 14 July 1991 on the characteristics of olive oil and olive-residue oil and on the relevant methods of analysis. *Off. J. Eur. Union* **1991**, *248*, 1–83.
27. Brand, W.A.; Coplen, T.B.; Vogl, J.; Rosner, M.; Prohaska, T. Assessment of international reference

- materials for isotope-ratio analysis (IUPAC technical report). *Pure Appl. Chem.* **2014**, *86*, 425–467.
28. SNIMA 08.5.090 Service de Normalisation Industrielle Marocaine (SNIMA) Huiles d'argane. Specif. Norme Marocaine NM 08.5.090 Rabat. 2003. Available online: <https://www.imanor.gov.ma/Norme/nm-08-5-090/> (accessed on 3 March 2021).
29. Portarena, S.; Gavrichkova, O.; Lauteri, M.; Brugnoli, E. Authentication and traceability of Italian extra-virgin olive oils by means of stable isotopes techniques. *Food Chem.* **2014**, *164*, 12–16.
30. Jiménez-Morillo, N.T.; Palma, V.; Garcia, R.; Dias, C.B.; Cabrita, M.J. Combination of Stable Isotope Analysis and Chemometrics to Discriminate Geoclimatically and Temporally the Virgin Olive Oils from Three Mediterranean Countries. *Foods* **2020**, *9*, 1855.
31. Kharbach, M.; Kamal, R.; Mansouri, M.A.; Marmouzi, I.; Viaene, J.; Cherrah, Y.; Alaoui, K.; Vercammen, J.; Bouklouze, A.; Vander Heyden, Y. Selected-ion flow-tube mass-spectrometry (SIFT-MS) fingerprinting versus chemical profiling for geographic traceability of Moroccan Argan oils. *Food Chem.* **2018**, *263*, 8–17.
32. Tharwat, A.; Gaber, T.; Ibrahim, A.; Hassanien, A.E. Linear discriminant analysis: A detailed tutorial. *AI Commun.* **2017**, *30*, 169–190.
33. Harhar, H.; Gharby, S.; Kartah, B.E.; El Monfalouti, H. Long Argan Fruit Drying Time is Detrimental for Argan Oil Quality. *Nat.Prod. Commun.* **2010**, *5*, 1799–1802.
34. Li, Y.; Liu, B.; Yu, Y.; Li, H.; Sun, J.; Cui, J. 3E-LDA: Three Enhancements to Linear Discriminant Analysis. *ACM Trans. Knowl. Discov. Data* **2021**, *15*, 1–20.

Chapitre 4

Comparative oil composition study of the endemic Moroccan olive (*Olea europaea* subsp. *maroccana*) and wild olive (var. *sylvestris*) in Central West Morocco

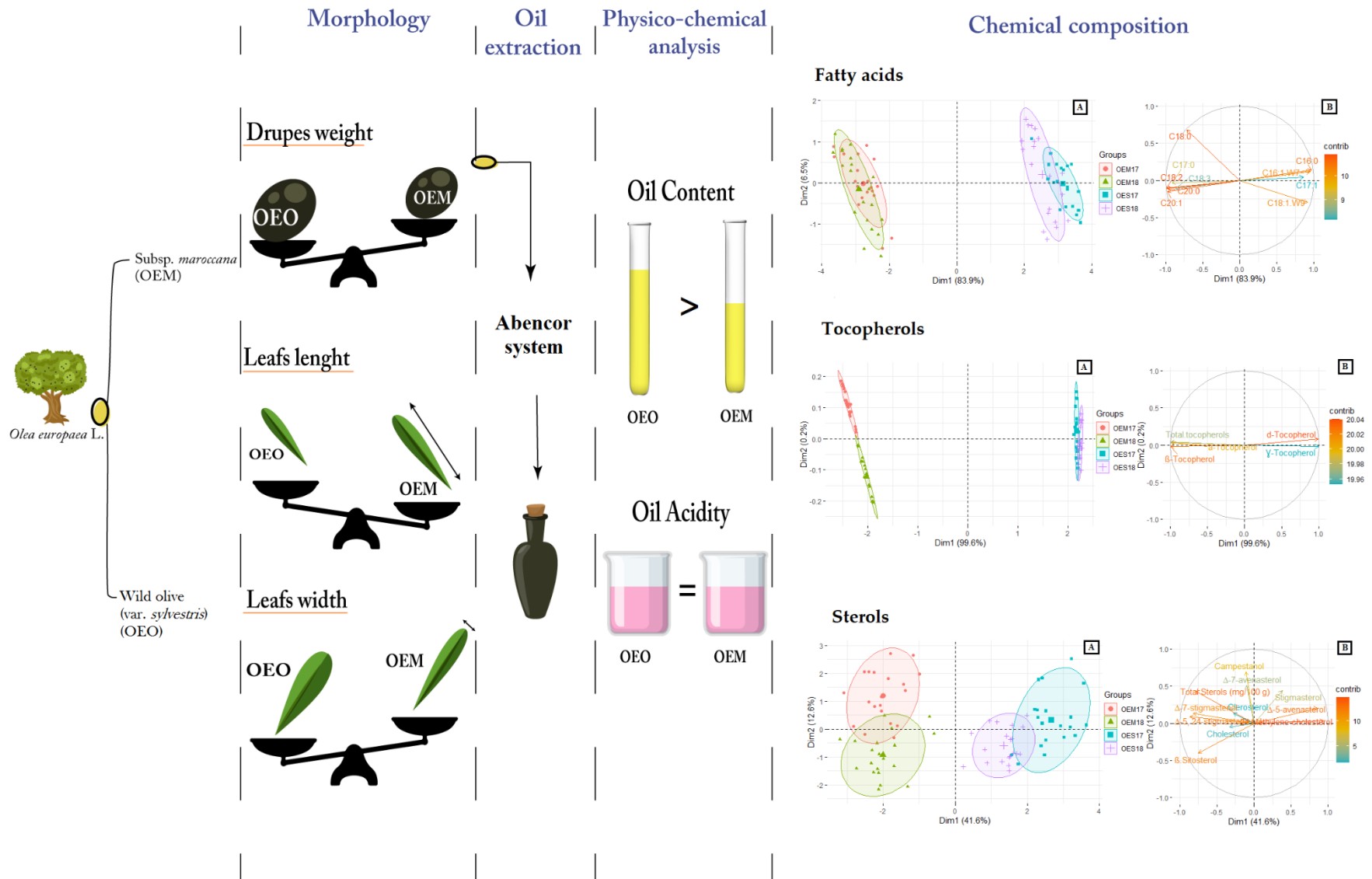
Cet article a été publié en Janvier 2021 dans la revue *Journal of food quality* Web of Science- (IF-2,45)/Scopus-(SJR-0,54, Q2).

Sara Elgadi^{1, 3}, Ahmed Ouhammou¹, Hamza Zine¹, Nadia Maata², Rachid Ait Babahmad¹ and Abderraouf El Antari³

1. Laboratory of Microbial Biotechnology, Agrosiences and Environment, Faculty of Sciences- Semlalia. Cadi Ayyad University. BP. 2390. 40 000. Marrakech. Morocco
2. Official Laboratory for Chemical Analysis and Research (LOARC). Casablanca. Morocco
3. Laboratory of Agro. Food Technology and Quality. Regional Center for Agronomic Research of Marrakech, National Institute of Agronomic Research (INRA).Marrakech. Morocco

*L'arganeraie est un écosystème qui abrite une diversité remarquable, ceci nous a conduit pratiquer d'autres voies de recherche prometteuse de la valorisation d'autres plantes oléagineuses de l'arganeraie, notamment les oliviers. Ce chapitre (4) présente l'étude de la sous-espèce méditerranéenne *Olea europaea* subsp. *sylvestris* (oléastre) et la sous-espèce micro-endémique *Olea europaea* subsp. *maroccana*. L'objectif de cette étude est donc la détermination de la teneur en huile et sa composition chimique en comparant leurs propriétés pendant deux années consécutives dans la même zone géographique de la région d'Ida Outanane.*

Résumé graphique



Abstract

Six wild olive subspecies (*Olea europaea* L.) are currently recognised globally, with two taxa co-occurring in the argan tree area in Central West Morocco: the widespread Mediterranean subspecies *europaea* var. *sylvestris* (the so-called oleaster) and the micro-endemic subspecies *maroccana*. Despite its taxonomic and ecological importance, the chemical composition of subsp. *maroccana* oil remains poorly known. Therefore, the aim of this study is to investigate the oil content and the chemical composition of subsp. *maroccana* and var. *sylvestris* as well as to compare their proprieties during two consecutive years (2017 and 2018) from the same geographical area. The fatty acid and the sterol compositions were analysed using gas chromatography. Additionally, the tocopherols content was determined using the high-performance liquid chromatography. The total amount of unsaturated fatty acids was higher in *maroccana* (85.24%) than in oleasters (79.05%). Additionally, tocopherol and phytosterol content of the *maroccana* oil (1232.35 mg/kg and 312.75 mg/100 g, respectively) was approximately two-fold higher than in oleasters (661.35 mg/kg and 210.06 mg/100 g, respectively). Analysis of variance and principal component analysis (PCA) of the chemical composition highlighted significant difference between the quantitative and qualitative properties of their oil. Finally, these findings suggest that *maroccana* oil could be considered as a potential source of vitamin E, essential fatty acids and sterols and can provide a nutraceutical oil for the local population. While this work contributes to the study of olive tree biodiversity, further investigations are still necessary to guide the putative nutraceutical use of subspecies *maroccana*.

Keywords: *Olea europaea*; subsp. *maroccana*; var. *sylvestris*; Wild olive; Oil composition; Fatty acids; Tocopherols; Sterols.

I. Introduction

Morocco is an extraordinary hotspot for plant diversity and endemism [1]. Many emblematic trees species exist in Morocco; one of the most remarkable is *Olea europaea* L. which belongs to the *Oleaceae*. This tree has two forms: cultivated *Olea europaea* L. subsp. *europaea* var. *europaea* and wild *O. europaea* subsp. *europaea* var. *sylvestris* (Mill.) Lehr. [2]. Wild olive trees are subdivided into six subspecies: *europaea* L. *guanchica* P. Vargas *et al.*, *cerasiformis* (Webb. & Berth.) Kunkel & Sunding, *laperrinei* (Batt. & Trab.) Cif, *cuspidata* (Wall. ex G. Don) Cif, and *maroccana* (Greuter & Burdet) P. Vargas *et al.*, [3]. *O. europaea* subsp. *maroccana* (OEM) is an endemic tree to Morocco that, exists in small and fragmented stands in the Western High Atlas, especially in Ida Outanane mountainous region [4], and constitutes a unique Moroccan olive tree population [5,6]. This tree grows in the occurrence area of the Moroccan argan tree (*Argania spinosa* (L.) Skeels) [5], which is characterised by high plant biodiversity, due to their arid and semi-arid climate with frequently oceanic influences [7]. According to Fennane *et al.* [4] and Médail *et al.* [5], ssp. *maroccana* grows in very limited areas and have some distinctive morphological characteristics: the tree is 1–4 m tall, the leaf is 40–70 mm long and 6–11 mm wide, the petiole is very short (0.2–0.7 cm) [4,5] and the drupes are globular to ovoid in shape with a relatively small size, ranging from 0.5-0.7 to 0.9-1.1 cm [5]. Subspecies *maroccana* blooms 30 to 40 days after ssp. *europaea* [5] and does not hybridise probably, Kassa *et al.* [3] linked this to the phenological differentiation and high ploidy level (hexaploid). Wild olive trees (oleasters), on the other hand, are very common in Morocco and massively grow in the north and central Moroccan plains [8]. The length of their leaves are 1.5-5 times longer than larger whereas the *maroccana* leaves are known to be 5-12 times longer than wide [4].

In Morocco, olive trees are cultivated over an area of approximately 1,070,000 ha, with the dominance of one cultivar (currently named ‘Zitoun Beldi’ or ‘Picholine Marocaine’), which represents 96% of trees [9]. Olive oil known by its good taste and high nutritional value, and it is considered one of the essential ingredients of the Mediterranean diet [10]. Indeed, several studies have shown that the composition of olive oil makes it beneficial for human health [11]. Olive oil is composed of a predominant fatty acid, monounsaturated oleic acid (up to 83% w/w) [12], as well as several phenolic compounds, phytosterols and tocopherols that constitute the unsaponifiable fraction [13]. Compared to people consuming sunflower oil, it has been reported by Soriguer *et al.* [14] that people consuming olive oil are at a lower risk of

obesity and hypertriglyceridemia and have lower high-density lipoprotein cholesterol levels. In addition, it is known that monounsaturated fatty acids reduce cardiovascular mortality [15]. Furthermore, tocopherols contribute to the prevention of cardiovascular diseases and certain types of cancer [16]. As mentioned in Bouarroudj *et al.* [17] and Dabbou *et al.* [18] olive oil from wild trees contains higher amounts of phenols, tocopherols and antioxidants compared to cultivated olive. Thus, the outcomes of investigating for new subspecies especially those occurring under arid and semi-arid conditions can eventually present an interesting potential source for cultivar genetic amelioration and further expand its therapeutic and nutraceutical potential for the local population although these crops resist well to marginal conditions.

To the authors' knowledge, no study has yet assessed the quality or chemical composition of subsp. *maroccana* oil. In this respect, the present study aims to investigate and compare the oil content, the quality indices and the chemical composition, particularly fatty acid, tocopherol and sterol between two *Olea europaea* subspecies: subsp. *maroccana* (OEM) and subsp. *europaea* var. *sylvestris* (OES) co-occurring the same environmental conditions.

II. Materials and Methods

2.1. Plant material. In general, subspecies *maroccana* is located in the Western High Atlas of Morocco, especially in the Ida Outanane mountainous region (30°39 N 9°09 W; 751 m), on a clay-sand substrate. *O. e.* subsp. *europaea* var. *sylvestris* (OES) samples were also collected in the same region (30°34 N 9°20 W; 620 m). Specimens' identification of *Olea* (Figure 1) was carried out through their characters (habit, vigor, leaf density, length of internodes), leaf characters (shape, length and width), inflorescence, fruit and endocarp characters. This identification was conducted in the fieldwork and confirmed by the use of local Floras and monographs. It was also in reference with the *exsiccatae* (collection of dried herbarium specimens) at Regional Herbarium of 'MARK', Cadi Ayyad University. All samples were collected randomly by hand from 20 adult trees at full maturity for each subspecies. Fruit sampling was performed for two successive years (December 2017 and December 2018). Precipitation in the year 2017 was 186.88 mm, lower compared to the year 2018, 312.78 mm. Rainfall data of the study area has downloaded from Worldclim [19].

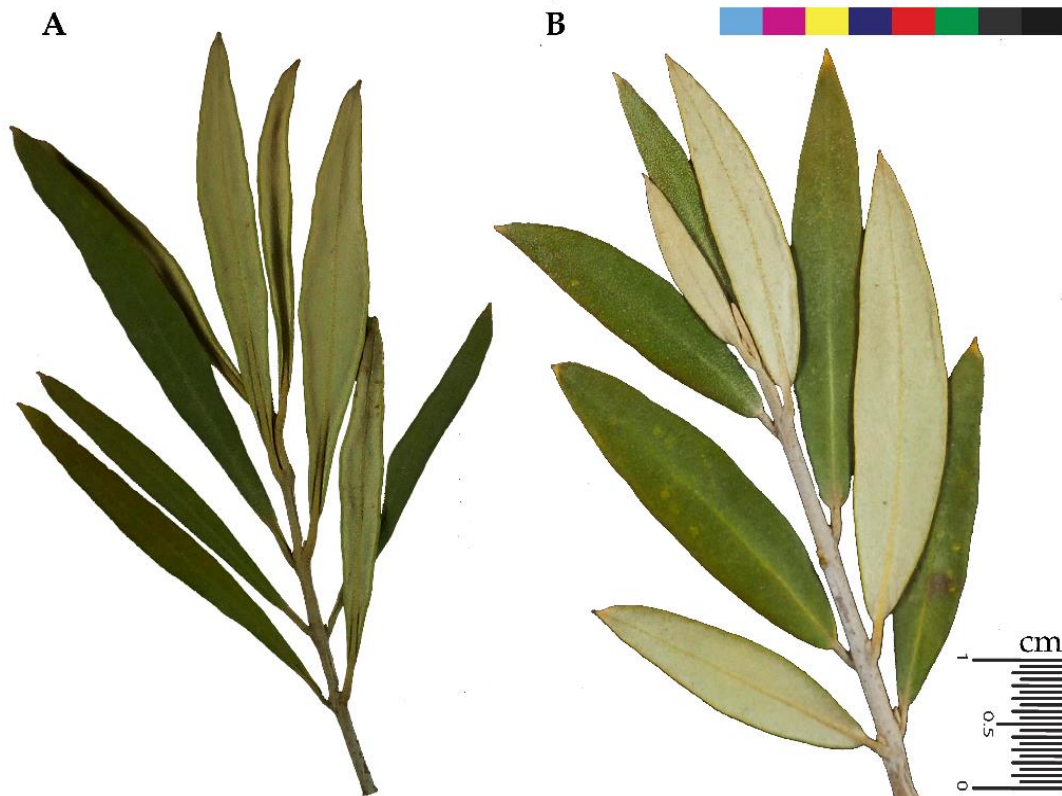


Figure 1. Branch of A) subsp. *maroccana* (OEM) and B) *O. e.* subsp. *europaea* var. *sylvestris* (OES)

2.2. Olive oil extraction. Oil was extracted within 24h of harvesting using an Abencor system. Olive drupes were washed and crushed; the paste obtained was submitted to malaxation for 30 min and centrifuged at 3500 rpm. Then, after the oil was decanted, it was preserved in dark glass bottles in a refrigerator at 4°C, filled with nitrogen to avoid oxidation.

2.3. Chemicals. All chemicals used for the determination of free acidity, spectroscopic UV indices (K232, K270) and peroxide value were purchased from Sigma (St. Louis, MO, USA). The internal standard, 5 α -cholestanol, the fatty acid methyl esters (FAME) standard mixture and tocopherol (α , γ and δ -tocopherols) were purchased from Sigma (St. Louis, MO, USA). Silica gel plate for thin-layer chromatography was purchased from Fluka (Buchs, Switzerland). Acetone, methanol, cyclohexane, ethanol, chloroform, petroleum ether and diethyl ether were purchased from Carlo Erba (Milan, Italy).

2.4. Physicochemical quality parameters. Free acidity (expressed as % oleic acid), spectrophotometric UV indices (K232, K270), peroxide value was given as milliequivalents of active oxygen per kilogram of oil (mEqO₂/kg) and oil content (%) were determined according to: ISO 660 (2009) [20], ISO 3656 (2002) [21], ISO 3960 (2007) [22] and ISO 659 (2009) [23], respectively.

2.5. Chemical composition

2.5.1. Fatty acids. The analytical method for the determination of fatty acid composition was described in regulation to the European Union standard methods [24], using 1 g of oil sample, 2 mL of petroleum ether and 3 mL of a methanolic potassium hydroxide solution (2 M). The methyl esters mixture was analysed by Gas Chromatography (CG, Varian CP 3380) equipped with a capillary column (CP-Wax 52 CB L = 30 m; Φ = 0.25 mm; δ = 0.20 μ m). The injector temperature was set at 220°C, and the temperatures of the flame ionisation detector (FID) and oven were maintained at 230°C and 190°C respectively, with nitrogen used as the carrier gas.

2.5.2. Tocopherols. According to ISO 9936 [25], 1 g of oil was dissolved in 25 mL of isooctane/isopropanol (99:1, v/v). Then analysed using high-performance liquid chromatography (Shimadzu LC-10 HPLC system) with a detector type RF-10AXL HPLC Fluorescence Detector (Shimadzu, Columbia, MD), and LiChrospher Si 60 column (L= 250 mm, Φ =4.6 mm, δ =5 μ m).

2.5.3. Phytosterols. The content of individual sterols and total sterols was determined according to a method described by Skiada *et al.* [26]. Trimethylsilylation of the sterol fraction was analysed according to the IOC method [27] using a gas chromatograph (HP 6890, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) equipped with a flame ionisation detector and capillary column (Agilent VF-5ms L=30 m, Φ =0.32 mm, ϕ =0.25 μ m) with fused silica from Agilent Technologies (Palo Alto, CA, USA).

2.6. Statistical analysis. All data were reported as the mean $\pm$ standard deviation (SD), of at least three analytical determinations on three replicated samples. Differences between the means were assessed using one-way analysis of variance (ANOVA) followed by Duncan's multiple range test. ANOVA was performed using SPSS Statistics version 21 (IBM Corp, Armonk, NY, USA), with p -values ≤ 0.05 considered statistically significant. Furthermore, principal component analysis (PCA) was applied to study the relations between the two subspecies on the chemical composition. The data matrix consisted of individuals (olive oil samples) and variables (fatty acids, tocopherols and phytosterols composition). The PCA was processed using R software version 3.6.2 (R Foundation for Statistical Computing, Vienna, AT).

III. Results and Discussion

3.1. Physicochemical quality parameters. It was found that the oil content (% dry matter) of ssp. *maroccana* is in the range of 5.32–5.46%, which is low in comparison to that of var. *sylvestris* (8.65–9.10%). Compared to the results obtained by Hannachi *et al.* [28], the oil content of *O. europaea* subsp. *cuspidata* from Kenya was found to be in the range of 5.0–7.7%, similar to the oil content of ssp. *maroccana*. In addition, the oil content of var. *sylvestris* from Tunisia was found to reach up to 8.02–15.06%, same as that of var. *sylvestris* from Morocco. Subsp. *maroccana* and var. *sylvestris* showed a very lower oil contents comparatively with Moroccan picholine 38.5–48% [29]. According to the IOC standards, olive oils extracted from OEM (*O. europaea* subsp. *maroccana*) and OES belong to the category of extra virgin olive oils (Table 1) [30]. In addition, it was found that the free acidity of the OEM and OES oils does not exceed the upper limit of 0.8%. The UV absorption coefficients (K232, K270) and peroxide value also confirmed that both oils are within the limit values of the IOC: $K232 \leq 2.5$, $K270 \leq 0.22$ and peroxide value ≤ 20 mEqO₂/kg oil. A significant difference was revealed in the oil content of var. *sylvestris* between the years of harvest, it can be explained by the high rate of

precipitation for the second year [31]. It should be noted that the results obtained for the physico-chemical parameters coincided with those obtained by Bouarroudj *et al.* [17] and Dabbou *et al.* [18].

Table 1. Oil content and quality indices of subsp. *maroccana* (OEM) and *O. e.* subsp. *europaea* var. *sylvestris* (OES) oils compared to EVOO for two successive years, 2017 and 2018.

	OEM (N=20)		OES (N=20)		EVOO (IOC. 2019)
	2017	2018	2017	2018	
Oil content (% dry matter)	5.32 ± 0.01 ^a	5.46 ± 0.07 ^a	8.65 ± 0.11 ^b	9.10 ± 0.20 ^c	
Free fatty acid (%)	0.30 ± 0.02 ^a	0.33 ± 0.02 ^a	0.30 ± 0.01 ^a	0.31 ± 0.02 ^a	≤ 0.80
K232	2.32 ± 0.01 ^c	2.08 ± 0.04 ^b	2.03 ± 0.02 ^b	1.89 ± 0.04 ^a	≤ 2.50
K270	0.14 ± 0.03 ^b	0.12 ± 0.01 ^{ab}	0.09 ± 0.03 ^a	0.10 ± 0.02 ^{ab}	≤ 0.22
Peroxide value (mEqO ₂ /kg oil)	3.41 ± 0.10 ^c	2.66 ± 0.07 ^d	6.38 ± 0.12 ^a	5.21 ± 0.09 ^b	≤ 20

Values are expressed as mean ± SD. Different letters in the same line designate significant differences (p<0.05). K232 and K270: ultraviolet specific extinction at 232 and 270 nm

3.2. Chemical composition

3.2.1. Fatty acids. As shown in Table 2, oleic acid was found to be predominant in both ssp. *maroccana* and var. *sylvestris* oils, but with a higher value (67.79%) in var. *sylvestris* oil, followed by palmitic acid (18.66%) and linoleic acid (8.20%). However, the opposite was true for ssp. *maroccana* oil, which has a low value of palmitic acid (10.65%) and the highest value observed of linoleic acid (19.81%). Linoleic acid can be used as a marker for ssp. *maroccana* oil. In OEM, except for the value of linolenic acid, all values were within the limits established by the IOC (2019) [30]. Similar results to those of ssp. *maroccana* oil were noted in the oil of *O. europaea* subsp. *cuspidata* from Kenya, in which the level of oleic acid was highest (44.3%), followed by linoleic acid (33.3%) and palmitic acid (12.1%) [30]. Similar results to those of var. *sylvestris* oil were also noted in several studies in Algeria [17], Tunisia [18], Spain [32] and Italy [33]. All fatty acids studied exhibited a significant difference between the composition of OEM and OES. A difference between the years of harvest was also noted, except for C16:1, C18:1, C20:0 and C20:1 for ssp. *maroccana* oil and C18:2, C18:3, and unsaturated fatty acid (UFA) for var. *sylvestris* oil. A cultivar can show different technological potentialities from one environment to another; this characteristic is known to play an important role in improving the fatty acid composition of the oil: this is what makes it possible to define geographical origins [34]. It was also found that ssp. *maroccana* oil is more unsaturated than var. *sylvestris* oil and,

hence, can be considered as a source of UFAs and a very important factor against cardiovascular diseases[15].

Table 2. Fatty acid composition (%) of subsp. *maroccana* (OEM) and *O. e.* subsp. *europaea* var. *sylvestris* (OES) for two successive years, 2017 and 2018.

		OEM (N=20)		OES (N=20)		EVOO (IOC, 2019)
	Fatty acid	2017	2018	2017	2018	
Palmitic acid	C16:0	10.65±0.03 ^a	10.89±0.07 ^b	18.66±0.06 ^c	19.02±0.01 ^d	7.50-20.00
Palmitoleic acid	C16:1 ω7	0.65±0.00 ^a	0.65±0.01 ^a	2.52±0.01 ^b	2.57±0.00 ^c	0.30-3.50
Margaric acid	C17:0	0.09±0.01 ^c	0.08±0.02 ^c	0.01±0.00 ^a	0.04±0.00 ^b	≤0.4
Margaroleic acid	C17:1	0.05±0.01 ^{ab}	0.03±0.01 ^a	0.09±0.01 ^c	0.07±0.00 ^{bc}	≤0.6
Stearic acid	C18:0	3.30±0.00 ^c	3.29±0.02 ^c	1.99±0.08 ^a	2.16±0.08 ^b	0.50-5.00
Oleic acid	C18:1 ω9	63.22±0.07 ^a	63.54±0.25 ^a	67.79±0.14 ^c	67.26±0.08 ^b	55.0-83.0
Linoleic acid	C18:2	19.81±0.00 ^c	19.19±0.16 ^b	8.20±0.02 ^a	8.13±0.01 ^a	2.50-21.00
Linolenic acid	C18:3	1.26±0.03 ^b	1.37±0.05 ^c	0.75±0.00 ^a	0.74±0.00 ^a	≤1.00
Arachidic acid	C20:0	0.60±0.00 ^b	0.60±0.00 ^b	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	≤0.60
Gadoleic acid	C20:1	0.35±0.00 ^b	0.35±0.00 ^b	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	≤0.50
Unsaturated fatty acid	UFA	85.35±0.04 ^c	85.14±0.05 ^b	79.34±0.14 ^a	78.76±0.09 ^a	
Saturated fatty acid	SFA	14.65±0.04 ^a	14.85±0.05 ^a	20.66±0.14 ^b	21.22±0.09 ^c	
Unsaturated fatty acid/Saturated fatty acid	UFA/SFA	5.82±0.02 ^d	5.73±0.02 ^c	3.84±0.03 ^b	3.71±0.02 ^a	

Values are expressed as mean ± SD. Different letters in the same line designate significant differences (p<0.05).

Principal component analysis (PCA) showed the score plot of PCA for subsp. *maroccana* (OEM) and var. *sylvestris* (OES) for two successive years, 2017 (17) and 2018 (18) according to their fatty acid composition (Figure 2). The first two principal components are significant and explain 90.4% of the total inertia. PC 1 (Dim1) presenting 83.9% of the total inertia. Whereas, PC2 (Dim2) presenting 6.5%. The most of the points for OEM17 and OEM18 were pointed to the left of PC1, meaning that OEM17 and OEM18 had large negative loadings on dimension 1. On the other hand, points for OES17 and OES18 are presented on the right of PC1, meaning that they had large positive loadings on dimension 1. According to parameters contribution (Figure 2, B) C18:0, C18:2, C20:0 and C20:1 could be considered as markers for ssp. *maroccana* oil and C16:0 for var. *sylvestris* oil. The impact of the harvest year was not very significant for OEM while the groups were distinct for OES. Subsp. *maroccana* and var. *sylvestris* were collected in the same region. Hence, the PCA was revealed a distinct separation between the two subspecies according to their fatty acid composition.

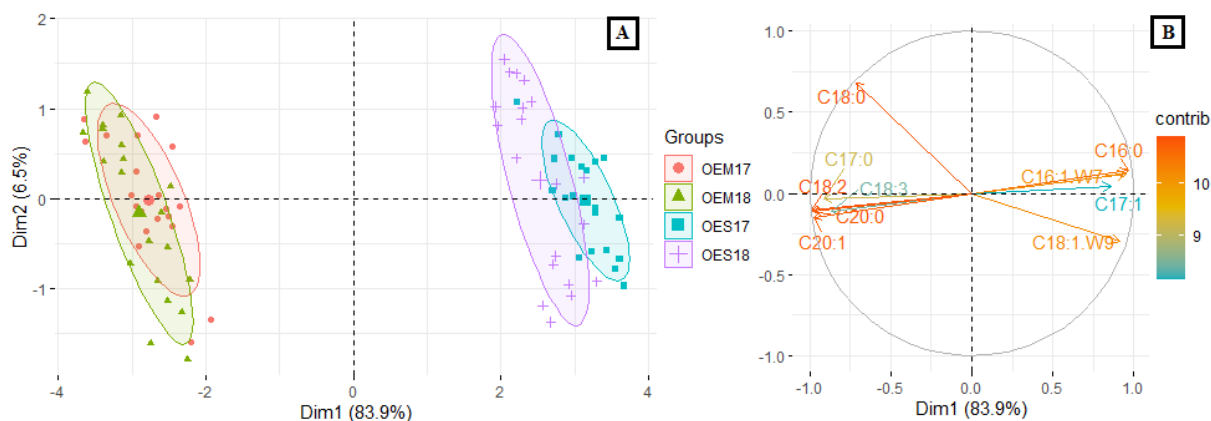


Figure 2. A) Scores and B) loading plots with Principal Component Analysis (PCA) for subsp. *maroccana* (OEM) and *O. e.* subsp. *europaea* var. *sylvestris* (OES) for two successive years, 2017 (17) and 2018 (18) according to their fatty acid composition.

3.2.2. Tocopherols. It should be noted that the total tocopherol value obtained from ssp. *maroccana* oil (1272 mg/kg) is twice as high as that obtained from var. *sylvestris* oil (683 mg/kg; Table 3). The results also showed that ssp. *maroccana* oil is rich in α - and β -tocopherols (1058.96-985.92 mg/kg and 188.63-177.86 mg/kg, respectively); with levels twice as high compared to the levels in var. *sylvestris* oil (533.96-496.91 mg/kg and 34.33-32.75 mg/kg, respectively). Moreover, the values of γ -tocopherol and δ -tocopherol in var. *sylvestris* oil were found to be 37.50 and 77.21 mg/kg, respectively, which are higher than the values found in ssp. *maroccana* oil (13.24 and 11.86 mg/kg, respectively). Significant variations between the years of harvest were noted for α -tocopherols, β -tocopherols and total tocopherols in ssp. *maroccana* and for γ -tocopherol and δ -tocopherol in var. *sylvestris*. Compared with the literature, lower values than those obtained from ssp. *maroccana* oil have been found. This high content of tocopherols is a good indicator for olive oils and has great benefits for human health [12]. On the other hand, the oil content of var. *sylvestris* from Tunisia was found to be close to that obtained by Baccouri *et al.* [35], (309.5-781.8 mg/kg) and higher than that obtained from Algerian wild olive (170-320 mg/kg) [36] and cultivated olive trees (84-463 mg/kg) [37]. It should be noted that the climatic conditions can also influence the tocopherol content especially α -Tocopherol and β -Tocopherol for ssp. *maroccana* and γ -Tocopherol and δ -Tocopherol for var. *sylvestris* which were significantly high in 2017, considered as dry year in comparison with 2018 [38].

Table 3. Tocopherol composition (mg/kg) of *Olea europaea* subsp. *maroccana* (OEM) and *O. e.* subsp. *europaea* var. *sylvestris* (OES) during 2017 and 2018.

		α -Tocopherol	β -Tocopherol	γ -Tocopherol	δ -Tocopherol	Total tocopherols
OEM (N=20)	2017	1058.96 $\pm$ 26 ^c	188.63 $\pm$ 3 ^c	13.24 $\pm$ 0.14 ^a	11.86 $\pm$ 0.09 ^a	1272.70 $\pm$ 29.23 ^c
	2018	985.92 $\pm$ 32 ^b	177.86 $\pm$ 5 ^b	17.16 $\pm$ 0.22 ^a	11.06 $\pm$ 0.13 ^a	1192.00 $\pm$ 37.35 ^b
OES (N=20)	2017	533.96 $\pm$ 13 ^a	34.33 $\pm$ 1.37 ^a	37.50 $\pm$ 1.24 ^c	77.21 $\pm$ 1.98 ^c	683.00 $\pm$ 17.59 ^a
	2018	496.91 $\pm$ 7 ^a	32.75 $\pm$ 1.09 ^a	37.05 $\pm$ 1.15 ^b	72.99 $\pm$ 1.66 ^b	639.70 $\pm$ 10.92 ^a

Values are expressed as mean $\pm$ SD. Different letters in the same row indicate significant differences (p<0.05)

Figure 3 showed the score plot of PCA for subsp. *maroccana* and var. *sylvestris* during two successive years, 2017 and 2018 according to their tocopherol composition. The first two principal components are very significant and explain 99.8% of the total inertia. PC 1 (Dim1) presenting 99.6% of the total inertia. However, PC2 (Dim2) presenting 0.2%. The most of the points for OEM17 and OEM18 were pointed to the left of PC1, meaning that OEM17 and OEM18 had large negative loadings on dimension 1. On the other hand, points for OES17 and OES18 are presented on the right of PC1, meaning that they had large positive loadings on dimension 1. Parameters contribution (Figure 3, B) revealed that δ -tocopherol could be considered as marker for var. *sylvestris* oil. While, α and β -tocopherols could be used as markers for ssp. *maroccana* oil. The impact of the harvest year was not very significant for var. *sylvestris* although the groups were distinct for subsp. *maroccana*: OEM17 in the positive loadings on dimension 2 and OEM18 in the negative loadings on dimension 2. The PCA was revealed a distinct separation between the two subspecies according to their tocopherols composition which confirming a strong botanical effect.

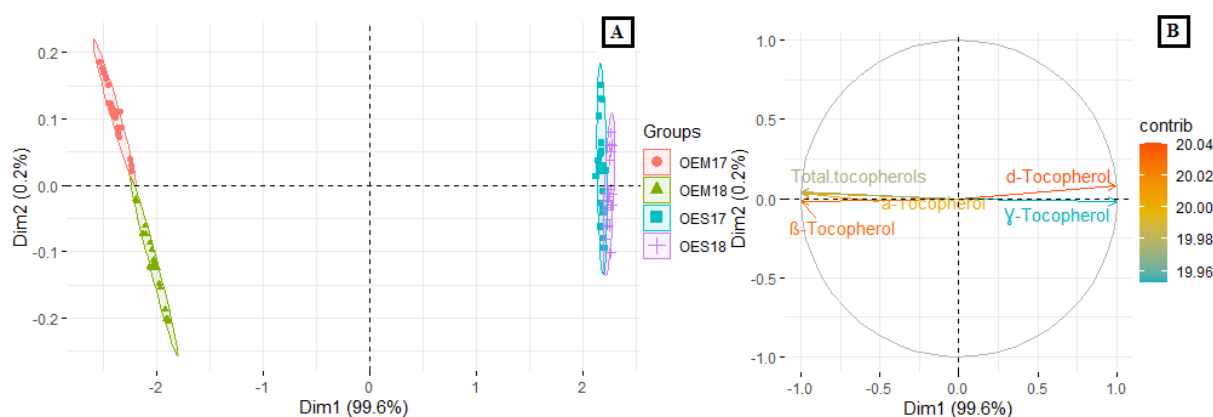


Figure 3. A) Scores and B) loading plots with Principal Component Analysis (PCA) for subsp. *maroccana* (OEM) and *O. e.* subsp. *europaea* var. *sylvestris* (OES) for two successive years, 2017 (17) and 2018 (18) according to their tocopherol composition.

3.2.3. Phytosterols. The content of total sterols was found to be higher in ssp. *maroccana* oil (269.35-356.15 mg/100 g) than in var. *sylvestris* oil (207.23-212.9 mg/100 g). It was also found that ssp. *maroccana* oil had the highest content of β -sitosterol (87.33-88.31%), Δ -7-stigmastenol (0.68-0.72%) and Δ -5,24-stigmastadienol (0.32-0.35%). On the other hand, var. *sylvestris* oil was found to have a high content of 24-methylenecholesterol (0.09-0.13%) and Δ -5-avenasterol (4.29-5.37%). However, no differences were observed regarding the levels of campestanol (Table 4). Significant differences were revealed between years in the majority of sterol compounds except 24-methylenecholesterol for ssp. *maroccana* and Δ -5, 24-stigmastadienol for both oils. Similar to what was found by Hannachi *et al.* [39], β -sitosterol is the major sterol, with a content in the range of 75.7–84.72%, in var. *sylvestris* oil. Additionally, Δ -7-stigmastenol can be considered a specific marker for ssp. *maroccana* oil [26]. Nevertheless, it was found that the total sterol content of var. *sylvestris* oil from Tunisia ranges from 1079.35 to 2068.17 mg/kg [40]. These values are close to those of total sterols obtained from var. *sylvestris* oil but still lower than those obtained from ssp. *maroccana* oil. In addition, the total sterol content in Portuguese olive oil was found to be in the range of 2003–2682 mg/kg [41], whereas that of Moroccan Picholine was found to be in the range of 1794.60–2038 mg/kg [34,35].

Table 4. Phytosterols content in mg/100g and the phytosterol composition (%) of *Olea europaea* subsp. *maroccana* (OEM) and *O. e.* subsp. *europaea* var. *sylvestris* (OES).

Sterols	OEM (N=20)		OES (N=20)		EVOO (IOC,2019)
	2017	2018	2017	2018	
Total Sterols (mg/100 g)	356.15±7.56 ^c	269.35±5.66 ^b	207.23±6.23 ^a	212.9±8.8 ^a	≥100
Cholesterol	0.36±0.01 ^c	0.32±0.03 ^b	0.30±0.02 ^{ab}	0.28±0.01 ^a	≤0.5%
24-Methylene- cholesterol	0.05±0.00 ^a	0.05±0.01 ^a	0.13±0.01 ^b	0.09±0.01 ^c	
Campesterol	3.69±0.02 ^{ab}	3.22±0.22 ^a	4.48±0.03 ^c	3.76±0.46 ^b	≤4.0%
Campestanol	0.07±0.00 ^{ns}	0.05±0.00 ^{ns}	0.06±0.00 ^{ns}	0.06±0.00 ^{ns}	< Campesterol
Stigmasterol	1.42±0.01 ^b	1.26±0.03 ^a	1.67±0.02 ^d	1.52±0.05 ^c	
Clerosterol	1.09±0.01 ^c	1.12±0.01 ^d	1.00±0.01 ^b	0.98±0.01 ^a	
β-Sitosterol	87.33±0.07 ^{ab}	88.31±1.67 ^b	85.43±0.05 ^a	86.67±1.10 ^{ab}	
Sitostanol	0.96±0.03 ^b	1.55±0.04 ^d	0.63±0.02 ^a	1.36±0.03 ^c	
Δ-5-avenasterol	3.35±0.04 ^b	2.50±0.05 ^a	5.37±0.02 ^d	4.29±0.23 ^c	
Δ-5, 24-stigmastadienol	0.35±0.01 ^b	0.32±0.10 ^b	0.10±0.00 ^a	0.14±0.09 ^a	≤0.4%
Δ-7-stigmastenol	0.72±0.01 ^d	0.68±0.01 ^c	0.24±0.00 ^a	0.26±0.01 ^b	
Δ-7-avenasterol	0.61±0.00 ^{ab}	0.62±0.00 ^b	0.61±0.00 ^{ab}	0.59±0.01 ^a	
Apparent β-Sitosterol*	93.45±0.16 ^{ab}	94.16±0.54 ^c	92.67±0.10 ^a	93.56±0.17 ^b	≥93%

*Apparent β-Sitosterol= Clerosterol+β-Sitosterol + Sitostanol +Δ-5-Avenasterol+Δ-7-Stigmastenol. N.S: Not significant. The statistical significance level was p<0.05.

The PCA in figure 4 was performed to discriminate subsp. *maroccana* and var. *sylvestris* oils according to their sterolic profile. The first two principal components explain approximately 54.2% of total variance. PC 1 (Dim1) presenting 41.6% of the total inertia. However, PC2 (Dim2) presenting 12.6%. The most of the points for OEM17 and OEM18 were pointed to the left of PC1, meaning that OEM17 and OEM18 had large negative loadings on dimension 1. Furthermore, OEM17 was pointed in the positive loadings on dimension 2 and OEM18 in the negative loadings on dimension 2 implying that the impact of the harvest year was significant. Dissimilar to subsp. *maroccana*, it was observed that most of the var. *sylvestris* points are shown to the right of PC1 and had large positive loadings on dimension 1. Figure 4 B showed that Δ-5-avenasterol and 24-Methylene-cholesterol had a high contribution and could be considered as markers for var. *sylvestris* oil. Furthermore, total sterols, Δ-7-stigmastenol, Δ-5,24-stigmastadienol could be used as markers for subsp. *maroccana* oil. Similar to subsp.

maroccana, the harvest year was significant on phytosterol composition of var. *sylvestris*. OEM and OES were clearly discriminated according to phytosterol composition.

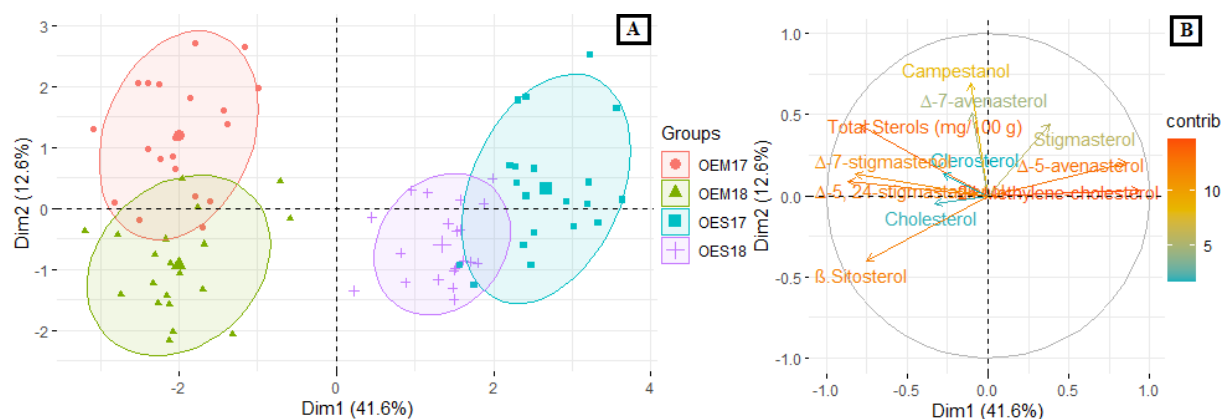


Figure 4. A) Scores and B) loading plots with Principal Component Analysis (PCA) for subsp. *maroccana* (OEM) and *O. e.* subsp. *europaea* var. *sylvestris* (OES) for two successive years, 2017 (17) and 2018 (18) according to their phytosterol composition.

In order to have a precise overview of the oil composition of subsp. *maroccana* and var. *sylvestris*, a combined principal component analysis was performed using fatty acid, tocopherol and sterol as variables (Figure 5). The first two principal components explain 73.5% of data variation. The most of the points for subsp. *maroccana* were pointed to the left of PC1, meaning that OEM had large negative loadings on dimension 1. Furthermore, var. *sylvestris* points are shown to the right of PC1 and had large positive loadings on dimension 1. Figure 5 B showed that C18:2, C20:0, C20:1, α and β -tocopherols, total tocopherols and total sterols had a high contribution and could be considered as markers for subsp. *maroccana*. In the other hand, C16:0, γ and δ -Tocopherol, Δ -5-avenasterol and 24-Methylene-cholesterol had a high contribution for var. *sylvestris* oil and could be considered as markers. The impact of the harvest year was significant for both oils. Therefore, the PCA of chemical composition data revealed a discrete separation between subsp. *maroccana* and var. *sylvestris*, by creating distinctive clusters.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest

Acknowledgment

Thanks are due to the staff of laboratory for chemical analysis especially Mr. M. Amakhmakh for his valuable assistance. The staff of laboratory of Agro-Food Technology and Quality (INRA-Marrakech) especially Mrs. M. Lachguer. Authors would like to thank Dr. A. Diarra, Mr E. Radouane (Ph.D. Student) and Dr. A. Aghraz for their advices.

References

- [1] S. Lala, A. Amri, and N. Maxted, "Towards the conservation of crop wild relative diversity in North Africa: checklist, prioritisation and inventory," *Genet. Resour. Crop Evol.*, vol. 65, no. 1, pp. 113–124, 2018.
- [2] P. Vargas and J. W. Kadereit, "Molecular fingerprinting evidence (issr, inter-simple sequence repeats) for a wild status of *olea europaea* l. (Oleaceae) in the eurosiberian north of the iberian peninsula," *Flora*, vol. 196, no. 2, pp. 142–152, 2001.
- [3] A. Kassa, H. Konrad, and T. Geburek, "Molecular diversity and gene flow within and among different subspecies of the wild olive (*Olea europaea* L.): A review," *Flora Morphol. Distrib. Funct. Ecol. Plants*, vol. 250, no. November 2018, pp. 18–26, 2019.
- [4] M. Fennane, M. Ibn Tattou, J. Mathez, A. Ouyahya, and J. El Oualidi, *Flore pratique du Maroc manuel de détermination des plantes vasculaires*, vol. 558, no. 2. 1999.
- [5] F. Médail, P. Quézel, G. Besnard, and B. Khadari, "Systematics, ecology and phylogeographic significance of *Olea europaea* L. ssp. *maroccana* (Greuter & Burdet) P. Vargas et al., a relictual olive tree in south-west Morocco," *Bot. J. Linn. Soc.*, vol. 137, no. 3, pp. 249–266, 2001.
- [6] G. Besnard, B. Khadari, P. Baradat, and A. Bervillé, "Combination of chloroplast and mitochondrial DNA polymorphisms to study cytoplasm genetic differentiation in the olive complex (*Olea europaea* L.)," *Theor. Appl. Genet.*, vol. 105, no. 1, pp. 139–144, 2002.
- [7] F. Msanda, A. El Aboudi, and J.-P. Peltier, "Biodiversité et biogéographie de l'arganeraie marocaine," *Agric.*, vol. 14, no. 4, pp. 357–364, 2005.
- [8] L. Emberger, *Aperçu général sur la végétation du Maroc: commentaire de la carte phytogéographique du Maroc 1: 1.500. 000*. 1939.
- [9] MAPMDREF, "(Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts – Morocco)," 2020.
- [10] H. Dıraman and H. Dibeklioglu, "Characterization of Turkish virgin olive oils produced from early harvest olives," *JAOCS, J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 86, no. 7, pp. 663–674, 2009.
- [11] A. El Antari, A. El Moudni, and H. Ajana, "Comparaison de la qualité et de la composition acide de l'huile d'olive de certaines variétés méditerranéennes cultivées au

- Maroc,” *Olivae*, vol. 95, pp. 26–31, 2003.
- [12] M. Gorzynik-debicka *et al.*, “Potential Health Benefits of Olive Oil and Plant Polyphenols,” *Int. J. Mol. Sci.*, 2018.
 - [13] M.-I. Covas, V. Ruiz-Gutierrez, and R. de la Torre, “Minor Components of Olive Oil: Evidence to Date of Health Benefits in Humans,” *Int. Life Sci. Inst.*, vol. 9, no. 2, pp. 161–180, 2005.
 - [14] F. Soriguer, G. Rojo-Martinez, A. Goday, E. Bordiu, R. Carmena, and E. Ortega, “Olive oil has a beneficial effect on impaired glucose regulation and other cardiometabolic risk factors . Di@bet.es study,” no. June, pp. 911–916, 2013.
 - [15] L. Schwingshackl and G. Hoffmann, “Monounsaturated Fatty Acids and Risk of Cardiovascular Disease: Synopsis of the Evidence Available from Systematic Reviews and Meta-Analyses,” *Nutrients*, pp. 1989–2007, 2012.
 - [16] F. Shahidi and A. C. De Camargo, “Tocopherols and Tocotrienols in Common and Emerging Dietary Sources : Occurrence , Applications , and Health Benefits,” pp. 1–29, 2016.
 - [17] K. Bouarroudj, A. Tamendjari, and R. Larbat, “Quality, composition and antioxidant activity of Algerian wild olive (*Olea europaea* L. subsp. *Oleaster*) oil,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 83, pp. 484–491, 2016.
 - [18] S. Dabbou *et al.*, “Comparison of the Chemical Composition and the Organoleptic Profile of Virgin Olive Oil from Two Wild and Two Cultivated Tunisian *Olea europaea*,” vol. 8, pp. 189–202, 2011.
 - [19] S. E. Fick and R. J. Hijmans, “WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas,” *Int. J. Climatol.*, vol. 37, no. 12, pp. 4302–4315, 2017.
 - [20] ISO 660, “Animal and vegetable fats and oils - Determination of acid value and acidity,” *Polish Comm. Stand. Warsaw, Pol.*, 2009.
 - [21] ISO 3656, “Animal and vegetable fats and oils - Determination of ultraviolet absorbance expressed as specific UV extinction,” *Int. Organ. Stand.*, 2002.
 - [22] ISO 3960, “Animal and Vegetable Fats and Oils-Determination of Peroxide Value-Iodometric (Visual) Endpoint Determination,” *Int. Organ. Stand. BSI Stand. London, UK*, 2007.
 - [23] ISO 659, “Oilseeds - Determination of oil content (Reference method),” *ISO*, 2009.
 - [24] Commission Regulation (EEC), “No. 2568/91 of 14 July 1991 on the characteristics of olive oil and olive-residue oil and on the relevant methods of analysis,” *Off. J. Eur. Union*, vol. 208, pp. 1–8, 1991.
 - [25] ISO 9936, “Animal and vegetable fats and oils - determination of tocopherols and tocotrienols contents - method using high performance liquid chromatography,” pp. 1–10, 1997.
 - [26] V. Skiada, P. Tsarouhas, and T. Varzakas, “Comparison and Discrimination of Two Major Monocultivar Extra Virgin Olive Oils in the Southern Region of Peloponnese, According to Specific Compositional/Traceability Markers,” *Foods*, vol. 9, no. 2, p. 155, 2020.

- [27] International Olive Council, "IOC," *Determ. sterol Compos. content Alcohol. Compd. by Capill. gas Chromatogr.*, vol. COI/T.20/, no. Doc. No 26/Rev, 2018.
- [28] H. Hannachi, H. Sommerlatte, C. Breton, and M. Msallem, "Oleaster (var . sylvestris) and subsp . cuspidata are suitable genetic resources for improvement of the olive (Olea europaea subsp . europaea var . europaea)," pp. 393–403, 2009.
- [29] S. El Qarnifa, A. El Antari, and A. Hafidi, "Effect of Maturity and Environmental Conditions on Chemical Composition of Olive Oils of Introduced Cultivars in Morocco," *J. Food Qual.*, vol. 2019, p. 14, 2020.
- [30] International Olive Council, "IOC," *Int. trade Stand. Appl. to olive oils olive-pomace oils.*, no. 3, pp. 1–17, 2019.
- [31] B. Alowaiesh, Z. Singh, and S. G. Kailis, "Harvesting time influences fruit removal force, moisture, oil content, free fatty acids and peroxide in the oil of Frantoio and Manzanilla olive cultivars," *Aust. J. Crop Sci.*, vol. 10, no. 12, pp. 1662–1668, 2016.
- [32] L. León, R. De La Rosa, L. Velasco, and A. Belaj, "Using wild olives in breeding programs: Implications on oil quality composition," *Front. Plant Sci.*, vol. 9, no. February, pp. 1–9, 2018.
- [33] N. G. Criscuolo, F. Guarino, C. Angelini, and I. National, "High Biodiversity Arises from the Analyses of Ancient Olive Trees of South of Italy," no. August, 2019.
- [34] H. Hannachi, M. Msallem, S. Ben Elhadj, and M. El Gazzah, "Influence of the geographical locations on the agronomical and technological potentialities of the olive tree (Olea europaea L.) in Tunisia," *Comptes Rendus - Biol.*, vol. 330, no. 2, pp. 135–142, 2007.
- [35] B. Baccouri *et al.*, "06_Composition virgin olive," *GRASAS Y ACEITES*, vol. 59, no. 4, pp. 346–351, 2008.
- [36] S. Boucheffa, A. Tamendjari, P. Rovellini, and S. Venturini, "Composition and antioxidant activity of some Algerian wild extra virgin olive oils," *Riv. Ital. delle Sostanze Grasse*, vol. 91, no. 3, pp. 177–185, 2014.
- [37] G. Beltran, A. Jimenez, C. Del Rio, M. Uceda, and M. P. Aguilera, "Journal of Food Composition and Analysis Variability of vitamin E in virgin olive oil by agronomical and genetic factors," vol. 23, pp. 633–639, 2010.
- [38] S. Dabbou *et al.*, "Effect of Pedoclimatic Conditions on the Chemical Composition of the Sigoise Olive Cultivar," *Chem. Biodivers.*, vol. 7, pp. 898–908, 2010.
- [39] H. Hannachi, N. Nasri, W. Elfalleh, N. Tlili, A. Ferchichi, and M. Msallem, "Fatty acids, sterols, polyphenols, and chlorophylls of olive oils obtained from tunisian wild olive trees (olea europaea l. var. sylvestris)," *Int. J. Food Prop.*, vol. 16, no. 6, pp. 1271–1283, 2013.
- [40] B. Baccouri, H. Manai, J. S. Casas, E. Osorio, and M. Zarrouk, "Industrial Crops & Products Tunisian wild olive (Olea europaea L . subsp . oleaster) oils : Sterolic and triterpenic dialcohol compounds," *Ind. Crop. Prod.*, vol. 120, no. December 2017, pp. 11–15, 2018.
- [41] M. R. Alves, S. C. Cunha, J. S. Amaral, J. A. Pereira, and M. B. Oliveira, "Classification of PDO olive oils on the basis of their sterol composition by multivariate analysis," vol.

549, pp. 166–178, 2005.

- [42] A. Bajoub, E. Hurtado-fernández, E. A. Ajal, and A. Fernández-, “Quality and chemical profiles of monovarietal north Moroccan olive oils from " Picholine Marocaine " cultivar : registration database development and geographical discrimination,” *FOOD Chem.*, 2015.
- [43] Y. El Kharrassi *et al.*, “Chemical and phytochemical characterizations of argan oil (*Argania spinosa* L. skeels), olive oil (*Olea europaea* L. cv. Moroccan picholine), cactus pear (*Opuntia megacantha* salm-dyck) seed oil and cactus cladode essential oil,” *J. Food Meas. Charact.*, vol. 12, no. 2, pp. 747–754, 2018.

Chapitre 5

Système d'information géographique des arganeraies du Centre Ouest Marocain

Après avoir mis en évidence les originalités de la zone d'étude, déterminé les groupements végétaux qui caractérisent les arganeraies de centre-ouest Maroc, exposé le potentiel des tocophéroles, des acides gras et des isotopes stables comme indicateurs de l'origine géographique dans les chapitres précédents (1, 2 et 3), ce chapitre 5 vient pour ficeler l'ensemble des données exposées séparément par la production d'un fond cartographique panoramique visuel et dynamique. La carte interactive présentée dans ce chapitre permet de mettre à la disposition des lecteurs, des gestionnaires et des praticiens une base de données cartographique inédite élaborée par le SIG pour chaque point relevé dans l'arganeraie du centre-ouest marocain.

I. Introduction

L'arganeraie joue un rôle socio-économique et environnemental très important. Elle fournit une multitude de biens et services éco-systémiques. Cette importance a permis la considération de ces écosystèmes en tant que patrimoine mondial avec un statut spécial de Réserve de Biosphère d'Arganeraie (RBA) par l'UNESCO en 1998.

Les systèmes d'information géographique (SIG) permettent de disposer les informations dans un système géo-référencé, avec une facilité de la superposition des couches de différentes natures (ESRI, 2012). Les SIG présentent un véritable outil largement utilisé dans plusieurs domaines tel que : la géologie, l'écologie, l'agriculture... dans le but de démontrer les interactions entre les paramètres du milieu (Analy, 2019)

La cartographie de l'arganier constitue un outil visuel facilitant l'accès rapide à l'information. Cela aidera à l'aménagement, la gestion et la conservation des arganeraies tout en assurant le développement de l'économie régionale (Faouzi *et al.*, 2015). Plusieurs études ont utilisé les SIG pour la cartographie de la délimitation et la densité des arganeraies (El Wahidi & Benali, 2017; Msanda *et al.*, 2021). Les SIG sont utilisés également dans la conservation des ressources phytogénétiques (Scheldeman *et al.*, 2007), les zones appropriées pour la conservation *in situ* (Parra *et al.*, 2007) et les niveaux de menaces affectant les espèces végétales (Jarvis *et al.*, 2005). Cependant, la cartographie de la composition chimique des huiles d'argan en relation avec leur milieu n'a pas eu lieu jusqu'à présent.

L'objectif de ce chapitre est de combiner les différents résultats obtenus à partir des chapitres précédents en commençant par la géologie, le climat, le couvert végétal jusqu'aux compositions chimique et isotopique des points relevés échantillonnés dans l'aire des arganeraies étudiées. L'ensemble des couches formées a permis l'élaboration d'une carte interactive. Ces derniers peuvent apparaître par un simple clic sur les points pour l'apparition d'une étiquette indiquant les différentes informations sur le milieu et sur l'huile d'argane. La carte interactive permet l'accès rapide à l'information par la digitalisation des résultats obtenus durant ce travail de recherche. Par conséquent, ces bases de données visuelles fournissent une multitude de données environnementales et chimiques des arganeraies du centre ouest Marocain.

II. Matériel et méthodes

La cartographie des résultats a été effectuée en deux étapes : (i) l'assemblage des résultats numériques et création des couches par ArcGis et QGis (ii) l'extraction des couches réalisées sous format KML et élaboration de la carte interactive par la superposition des calques à l'aide de l'outil My Map offert par le service Google (Fig.1).

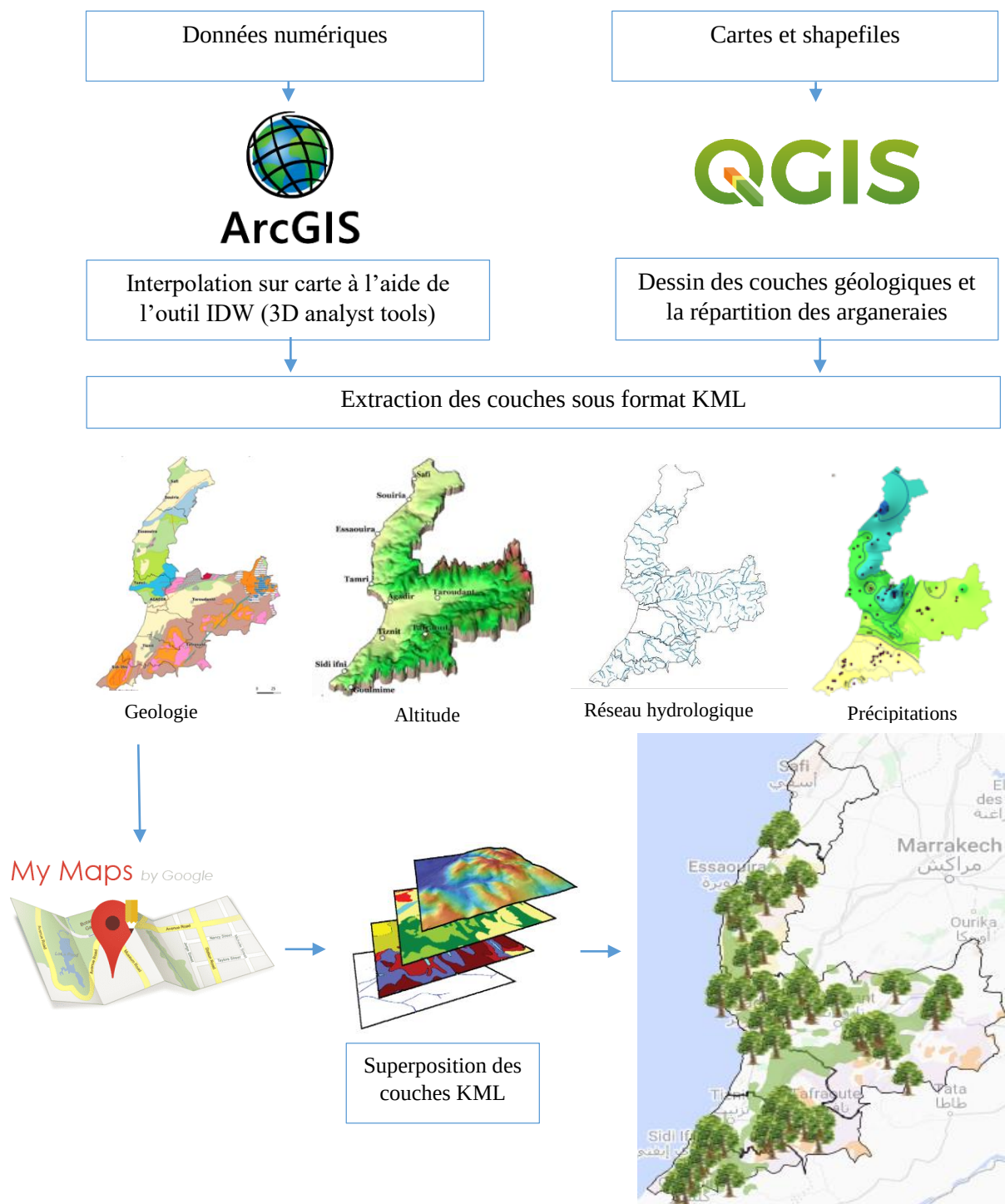


Figure 1. Etapes d'élaboration de la carte interactive

III. Résultats

La carte interactive élaborée permet l'obtention de l'information emmagasinée dans chaque couche par un simple clic (Fig. 2). Nous avons utilisé deux symboles pour une meilleure illustration. Le premier est sous forme d'un arbre d'arganier contenant les géographiques et climatiques (altitude, précipitations, températures,...) ainsi que le groupement végétal du point relevé (Fig. 3). Le deuxième symbole est la gouttelette d'huile d'argan, cette étiquette contient les informations sur la composition chimique en acides gras, en isotopes stables et en tocophérols (Fig. 4). Les couches géologiques ont été également ajoutées avec l'apparition de l'étiquette contenant le nom de la formation géologique ainsi que sa superficie et sa circonférence (Fig. 5). L'aire de la répartition de l'arganier a été réalisée sur la base de la carte Msanda *et al.*, (2021). L'étiquette de cette couche apparait également avec la superficie et la circonférence (Fig. 6).

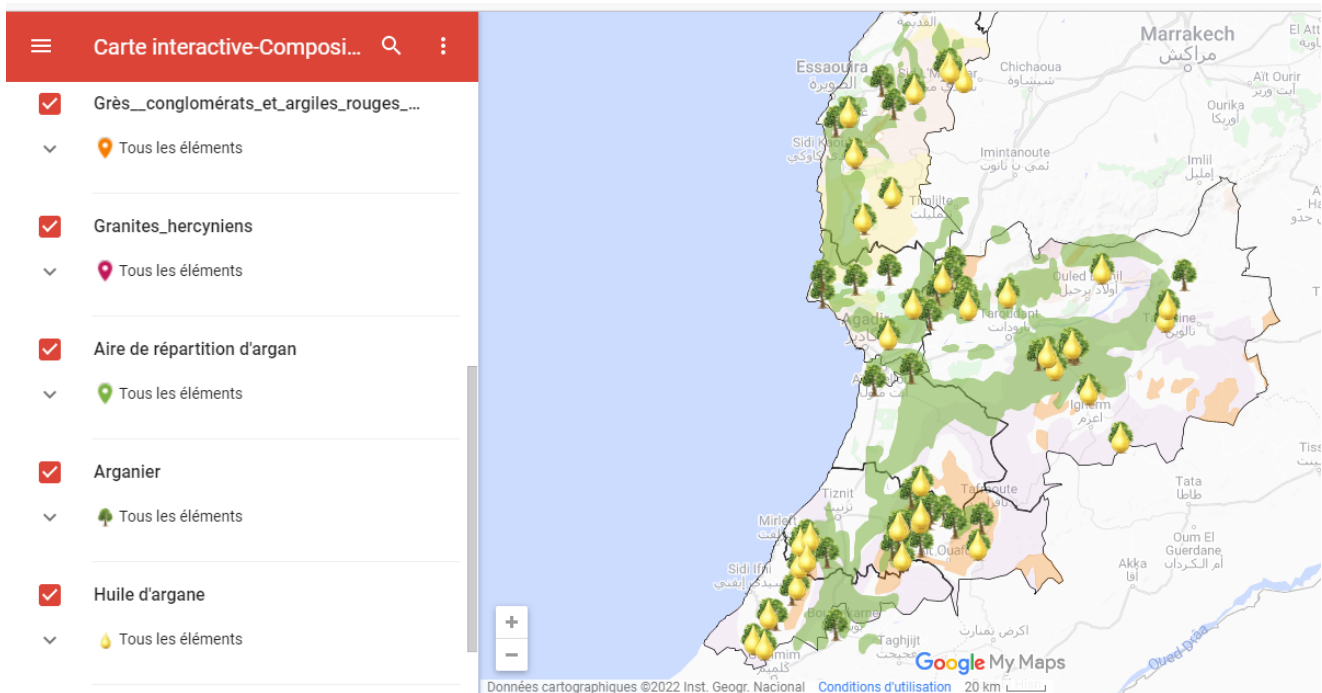


Figure 2. Carte interactive des arganeraies du centre ouest Marocain

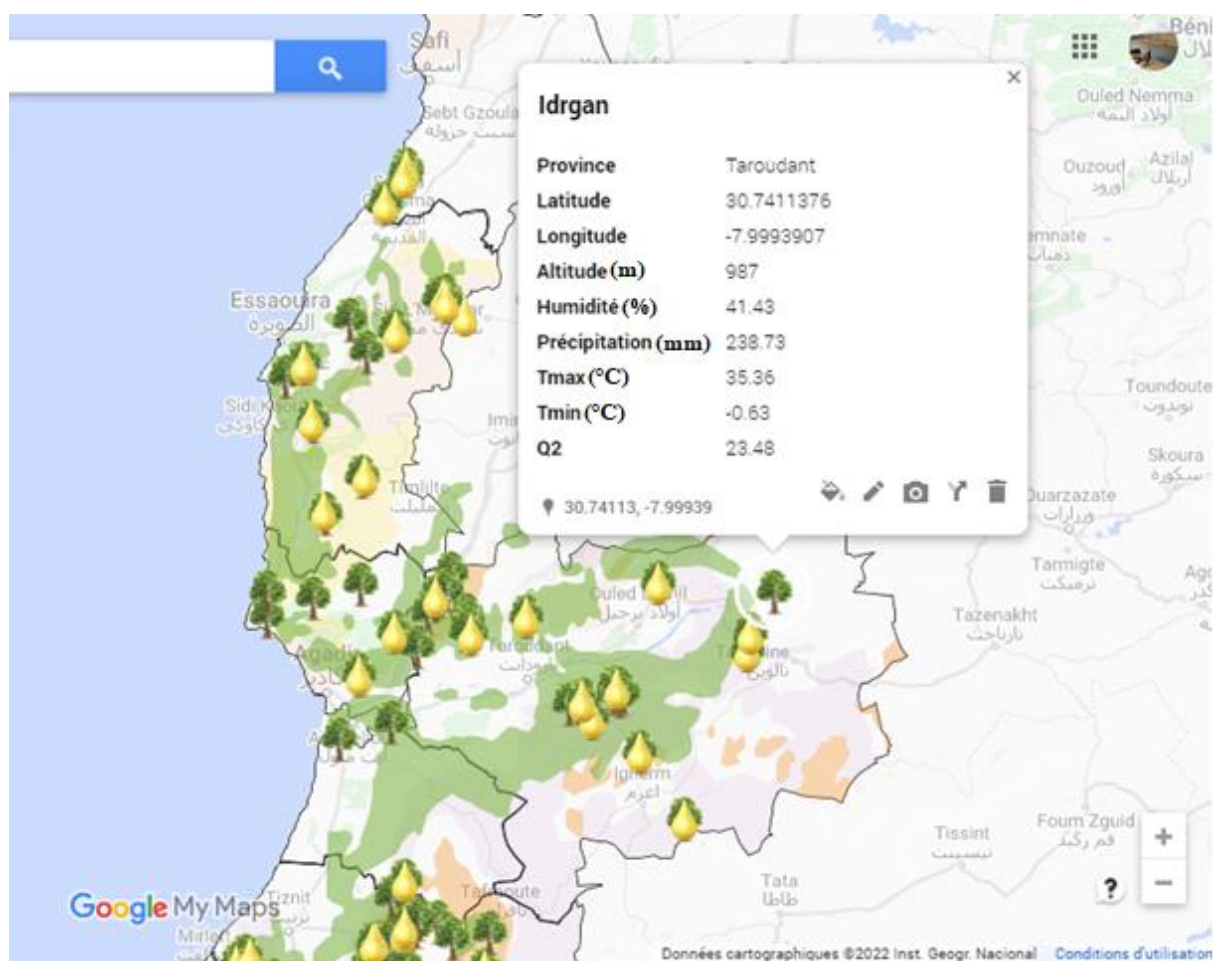


Figure 3. Étiquette des paramètres géographiques et climatiques des arganieraies de la zone Centro-occidentale du Maroc

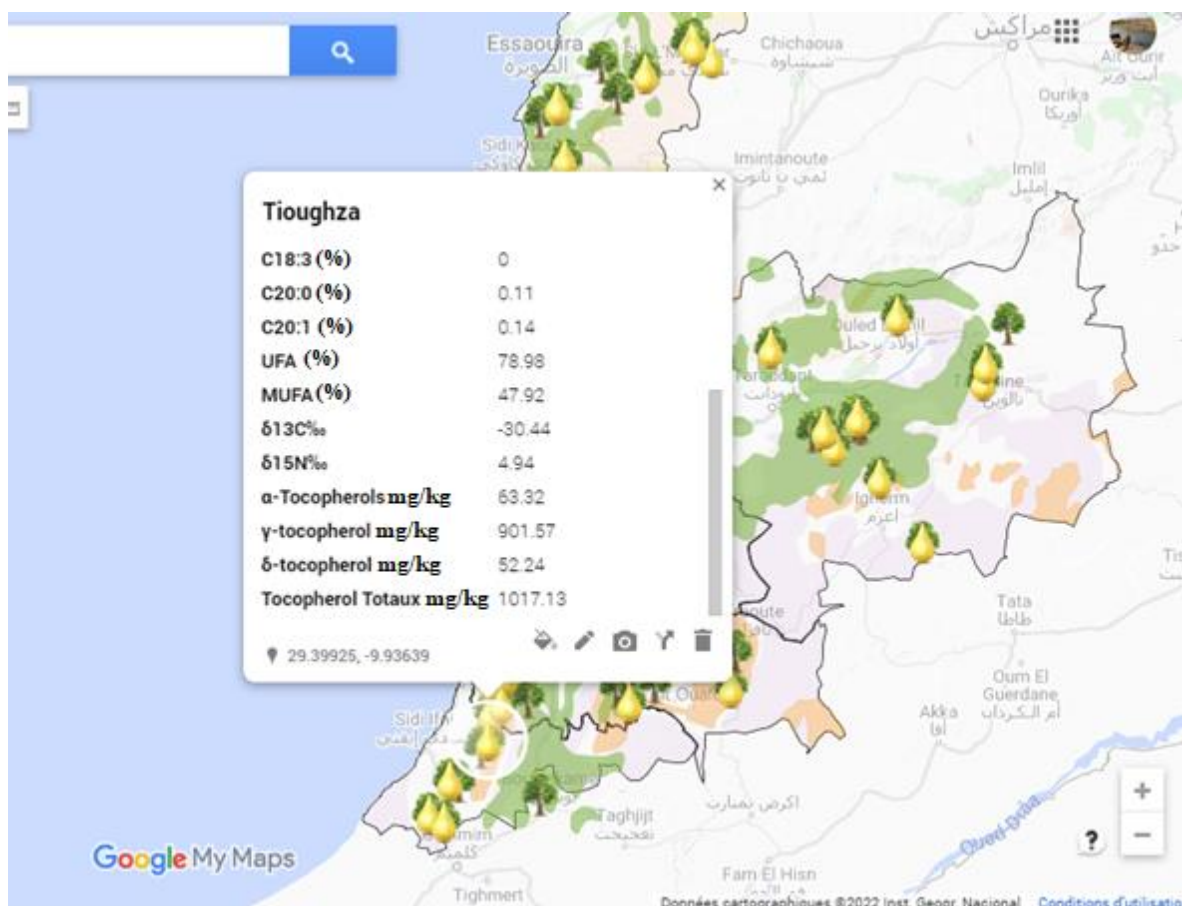


Figure 4. Étiquette des compositions chimique et isotopique des huiles des arganeraies

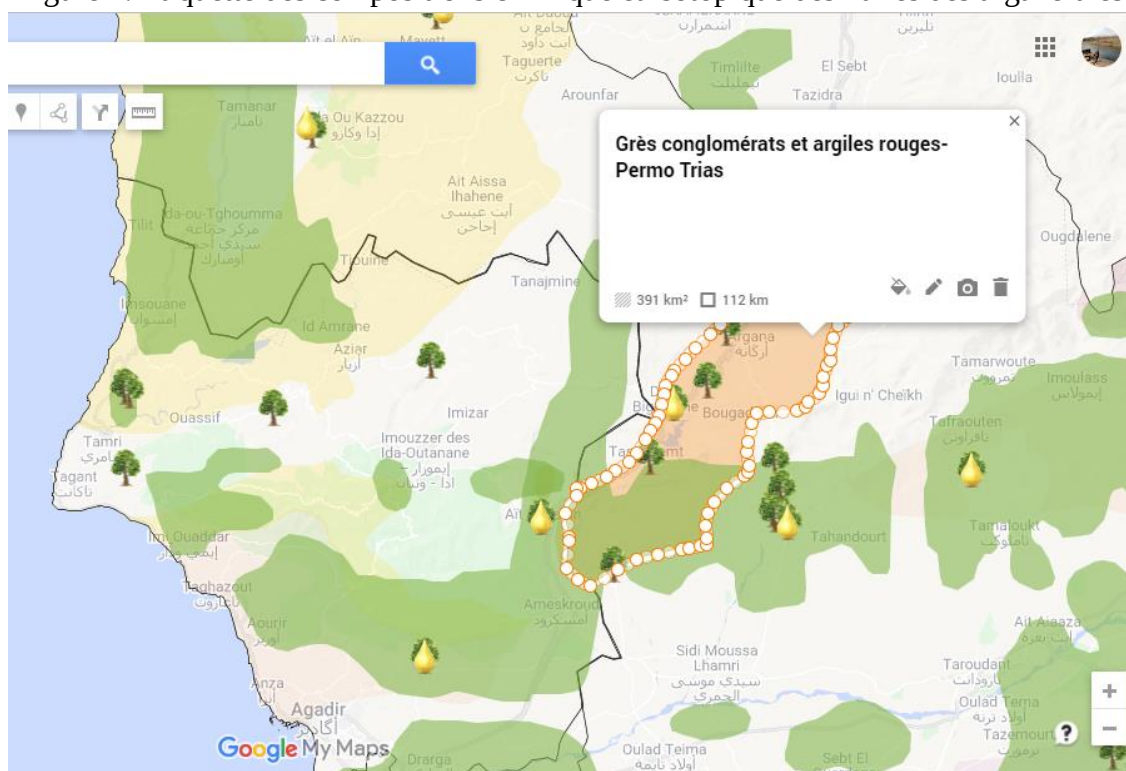


Figure 5. Étiquette de la formation géologique

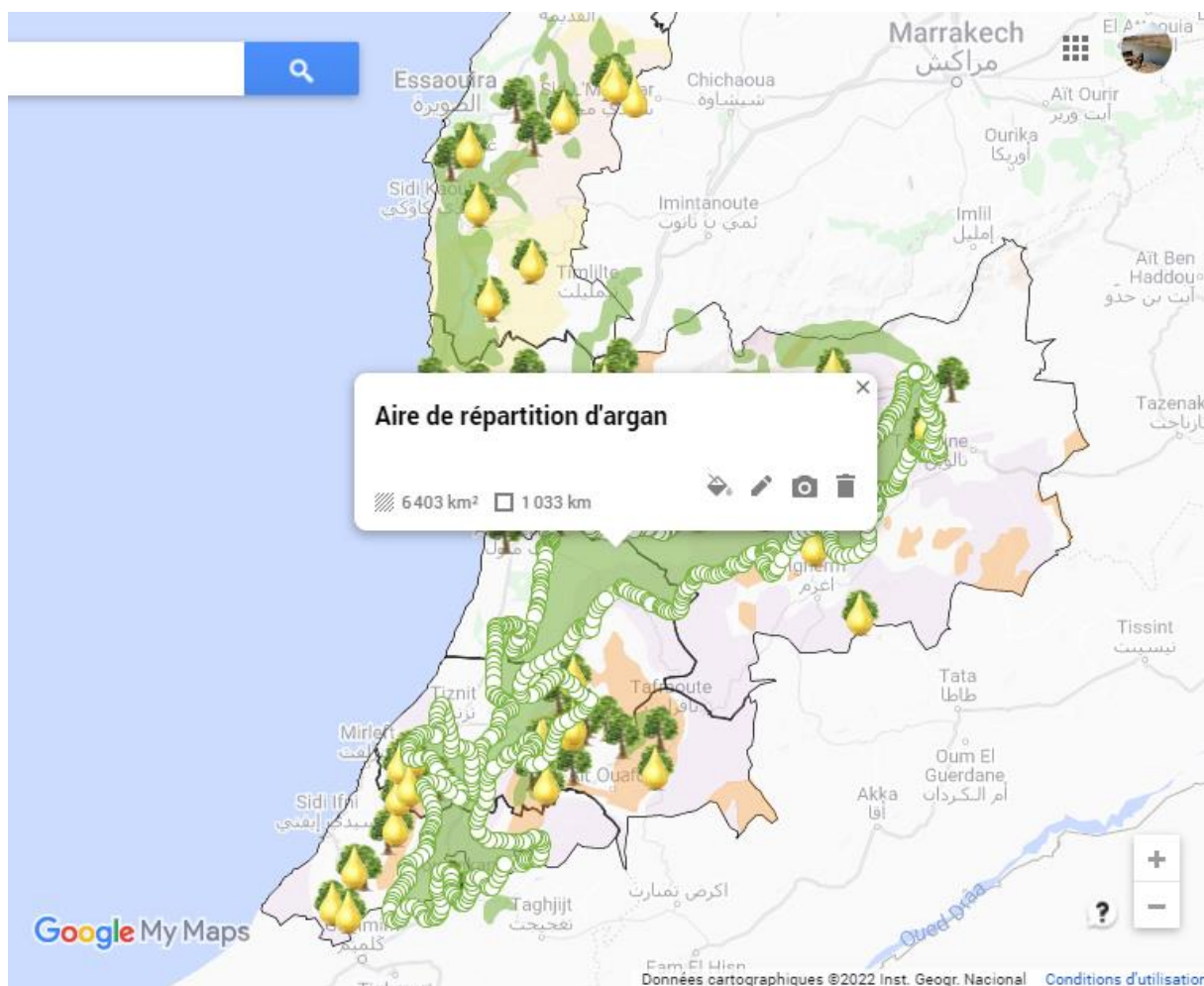


Figure 6. Étiquette de l'air de répartition des arganeraies de la zone Centro-occidentale du Maroc

IV. Conclusions

L'usage des systèmes d'information géographique combinée à la carte interactive ont permis la digitalisation des résultats obtenus et collectés dans ce travail de recherche. L'accès rapide à l'information peut avoir un impact très important sur la bonne gestion et dans la prise de décision pour la conservation des ressources naturelles.

Cette plateforme contribue à assembler les données physique, chimique et isotopique sur les arganeraies et les huiles traitées dans cette recherche. Elle permettra certainement aux laboratoires de contrôler et protéger l'origine géographique des huiles. Cette base est une initiative pour la réalisation d'une plateforme plus développée incluant la majorité des travaux de recherches sur les différents aspects des études relatives aux arganeraies Centro-occidentales marocaines.

Références

- Analy, C. (2019). *Apport du SIG et de la modélisation pour la caractérisation des écosystèmes de l' arganeraie en vue de leur conservation et utilisation durable*. 119p
- El Wahidi, F., & Benali, A. (2017). *Indicateurs de suivi de la dynamique de dégradation qualitative : Modélisation logistique et analyses multivariées . - cas de la forêt d ' arganier - Maroc* (Issue October).
- ESRI (2012). Les solutions SIG du leader mondial des Systèmes d'Information Géographique | Esri France (consulté le 20-04-2022).
- Faouzi, K., Rharrabti, Y., Boukroute, A., Mahyou, H., & Berrichi, A. (2015). Nature & Technology Cartographie de l ' aire de répartition de l ' arganier (*Argania spinosa*. *Nature & Technologie*, 12, 16–24.
- Jarvis, A., Williams, K., Williams, D., Guarino, L., Caballero, P. J., & Mottram, G. (2005). Use of GIS for optimizing a collecting mission for a rare wild pepper (*Capsicum flexuosum* Sendtn.) in Paraguay. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 52(6), 671–682. <https://doi.org/10.1007/s10722-003-6020-x>
- Msanda, F., Mayad, E. H., & Furze, J. N. (2021). Floristic biodiversity, biogeographical significance, and importance of Morocco's Arganeraie Biosphere Reserve. *Environmental Science and Pollution Research*, 10. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11936-0>
- Scheldeman X., Willems L., d'Eeckenbrugge C., Romeijn-Peeters E., Restrepo M., Romero J., Jiménez D., Lobo M., Medina C., Reyes C., Rodríguez D., Ocampo JA., Van Damme P., Goetgebeur P. (2007). Distribution, diversity and environmental adaptation to highland papayas (*Vasconcellea* spp.) in tropical and subtropical America. *Biodiversity Conservation* 16: 1867–1884.
- Parra, H. M., Draper, D., & Iriondo, J. M. (2007). GIS-based evaluation of the in situ conservation of a Crop Wild Relative: the case of Spanish lupins. *Bocconea*, 21, 105–116.

Chapitre 6

Contribution à la mise à jour de la norme NM.08.5.090

Le sixième chapitre de ce travail s'intéresse à une combinaison des résultats obtenus dans ce travail avec la bibliographie existante en la matière, dont le but ultime est la mise à jour de la norme NM.08.5.090 de l'huile d'argane, afin de renforcer le positionnement de l'huile d'argan dans le marché mondial comme un produit de terroir de la zone Centro-occidentale marocaine.

I. Introduction

L'arganier (*Argania spinosa* (L.) Skeels) offre une huile précieuse préparée soit à base d'amandons torréfiées puis extraite mécaniquement ou traditionnellement appelée huile alimentaire, soit préparée à partir d'amandons non torréfiées extraite mécaniquement ou par des solvants appelée huile cosmétique.

Les fruits de l'arganier subissent un long processus depuis la récolte jusqu'à la commercialisation (stockage, extraction, conservation...). Ce long processus peut nuire à la qualité des huiles d'argane et par conséquent engendrer des dégâts économiques énormes. D'où l'intérêt d'appliquer des normes afin de fournir un référentiel pour la valorisation des produits et assurer la qualité et la pureté des huiles (IMANOR, 2022).

L'huile d'argane a une composition chimique riche en acides gras, tocophérols (Vitamine E), stérols et polyphénols ((Hilali *et al.*, 2005; Harhar *et al.*, 2011; Gharby *et al.*, 2013; Kharbach *et al.*, 2017; Aithammou *et al.*, 2019; Elgadi *et al.*, 2021). La composition chimique constitue les paramètres de pureté, en plus des paramètres de qualité. Ils forment ensemble la base de la Norme marocaine N.M.08.5.090 des huiles d'argane établie en 2003. Cette dernière comporte quatre (4) catégories pour l'huile d'argane alimentaire : huile d'argane vierge extra, huile d'argane vierge fine, huile d'argane vierge courante et huile d'argane vierge lampante. Ces catégories sont liées essentiellement aux paramètres de qualité.

D'après les résultats obtenus dans cette recherche ainsi que ceux de travaux similaires, la qualité et la composition chimique des huiles d'argane sont affectées par les conditions de l'environnement, les conditions d'extraction et du stockage ce qui nécessite d'être vigilant pour l'actualisation de notre norme commerciale.

A cet effet, nous avons ciblé l'évaluation du potentiel réel de deux fractions majeures des paramètres de pureté en respectant une extraction contrôlée et un échantillonnage représentatif de l'aire des arganeraies. Nous avons noté, à la suite de l'analyse de nos résultats et ceux de la bibliographie spécialisée, certains paramètres dépassant les limites de la norme et d'autres considérés avec une marge surévaluée. Une comparaison entre la composition de l'huile non-torréfiée et de l'huile torréfiée a également été réalisée afin de déceler les différences entre les deux types d'huiles. Les techniques d'extraction et d'analyse ont été prises en considération pour examiner les changements de composition en fonction des techniques utilisées.

II. Paramètres de qualité

Les résultats de l'acidité et de l'extinction spécifique à 270 nm (K270) concordent avec les limites établies par la norme marocaine des huiles d'argan. La limite pour K232 n'est pas encore précisée par la norme et généralement ne dépasse pas 1,88 pour l'huile alimentaire et 1,87 pour l'huile non-torréfiée. L'indice de peroxyde est un élément important pour la détermination du taux d'oxydation des huiles, la valeur la plus élevée réellement enregistrée est de 2,2 mEq O₂/kg pour l'huile alimentaire et 2,61 mEq O₂/kg pour l'huile non-torréfiée ce qui est loin de la valeur fixée par la norme pour l'huile d'argane extra vierge (≤ 15 mEq O₂/kg). Comme l'indice de peroxydes, la norme marocaine considère une limite supérieure pour l'acidité très loin des valeurs réellement enregistrées (Tableaux 1 et 2).

Tableau 1 : les paramètres de qualité des huiles d'argane torréfiées

Technique d'extraction	Technique d'analyse+type de colonne	Nombre d'échantillon	Zone d'étude	Année	Acidité	Indice de peroxyde	K232	K270	Référence
				2016	$\leq 0,8$	≤ 15	-	$\leq 0,35$	(SNIMA, 2016)
				2019	$\leq 0,8$	≤ 20	$\leq 2,50$	$\leq 0,22$	(COI, 2019)
Torréfaction traditionnelle et extraction par presse mécanique coopérative (Komet DD85G-IBG Montforts Oekotec GmbH)	EEC/2568/91 Commission de l'Union européenne pour l'huile d'olive	19	Essaouira, Oujda, Agadir, Taroudant	2005	0,3	1,25	-	0,23	(Hilali <i>et al.</i> , 2005)
Torréfaction (110°C pour 20 min) en utilisant SMIR roaster (Technotour, Agadir, Morocco). Extraction par Komet DD 85 G press (IBG Monforts Oekotec GmbH & Co. KG, Mönchengladbach, Germany).	Acidité (ISO 660); Indice de peroxyde (ISO 3960); Extinction spécifique (EEC/2568/91)	2	Taroudant	2012	0,3	0,6	1,02	0,18	(Gharby <i>et al.</i> , 2012)
Extraction par presse mécanique coopérative	EEC/2568/91 Commission de l'Union européenne pour l'huile d'olive	150	Ait- Baha, Agadir, Essaouira, Tiznit, Taroudant	2019	0,22 - 0,34	1,7-2,2	1,19-1,88	0,21-0,33	(Kharbach <i>et al.</i> , 2019)

Tableau 2 : les paramètres de qualité des huiles d'argane non-torréfiées

Technique d'extraction	Technique d'analyse+type de colonne	Nombre d'échantillon	Zone d'étude	Année	Acidité	Indice de peroxyde	K232	K270	Référence
Extraction par presse mécanique coopérative (Komet DD85G-IBG Montforts Oekotec GmbH)	EEC/2568/91 Commission de l'Union européenne pour l'huile d'olive	19	Essaouira, Oujda, Agadir, Taroudant	2005	0,5	0,25	-	0,27	(Hilali <i>et al.</i> , 2005)
Extraction hexanique par soxhlet	EEC/2568/91 Commission de l'Union européenne pour l'huile d'olive	19	Essaouira, Oujda, Agadir, Taroudant	2005	0,2	1,6	-	0,28	(Hilali <i>et al.</i> , 2005)
Extraction par Komet DD 85 G press (IBG Monforts Oekotec GmbH & Co. KG, Mönchengladbach, Germany).	Acidité (ISO 660); Indice de peroxyde (ISO 3960); Extinction spécifique (EEC/2568/91)	2	Taroudant	2012	0,3	0,9	1,22	0,16	(Gharby <i>et al.</i> , 2012)
Presse mécanique au laboratoire (Komet CA59G-IBG Monforts Oekotec)	Acidité (ISO 660) , Indice de peroxyde (ISO 3960), Extinction spécifique (ISO 3656)	39	Safi, Essaouira, Agadir, Taroudant, Tiznit, Sidi Ifni	2021	0,15 - 0,26	1,46 - 2,13	0,94-1,05	0,14-0,18	(Elgadi <i>et al.</i> , 2021c)
Extraction par un fluide supercritique	méthode d'AOCs	1	Non spécifié	2013	0,3-0,5	0,5-0,9	-	-	Taribak <i>et al.</i> , 2013
Extraction par presse mécanique coopérative	EEC/2568/91 Commission de l'Union européenne pour l'huile d'olive	120	Ait- Baha, Agadir, Essaouira, Tiznit, Taroudant	2017	0,22 - 0,35	1,31 - 2,21	1,17-1,87	0,21-0,33	(kharbach <i>et al.</i> , 2017)
Extraction par presse mécanique coopérative	Acidité (ISO 660) , Indice de peroxyde (ISO 3960), Extinction spécifique (ISO 3656)	10	Agadir	2019	0,7- 1,16	0-2,61	-	0,19-0,33	(Aithammou <i>et al.</i> , 2019)

III. Acides gras

En analysant les tableaux 3 et 4, nous remarquons que la majorité des résultats obtenus pour l'huile d'argane torréfiée et non-torréfiée respectent les valeurs établies par la norme marocaine NM.08.5.090, à l'exception des résultats obtenus par Taribak *et al.*, (2013) concernant l'acide linolénique (C18:3) qui est compris entre 1,6 et 1,7% ce qui dépasse la valeur fixé par la norme 0,3%. Cette différence peut être attribuée à la technique d'extraction utilisée. L'extraction par un fluide supercritique est une technique assez développée d'extraction et peut mettre en évidence une composition aussi riche que celle par les méthodes d'extraction traditionnelles et mécaniques. L'acide palmitique (C16:0) a dépassé également la valeur établie par la norme (15%) dans les travaux de Elgadi *et al.*, (2021b) pour l'huile non-torréfiée (15,85%).

Les différences entre les acides gras des huiles torréfiées et non-torréfiées sont faibles, cependant l'huile non-torréfiée reflète le potentiel réel de l'huile d'argane car elle conserve la majorité des composants chimiques contrairement à l'huile torréfiée dont les graines ont subi un prétraitement par la chaleur.

IV. Tocophérols

Le tableau 5 présente les résultats bibliographiques concernant la teneur des quatre formes des tocophérols et les valeurs établies par la norme N.M.08.5.090. L'analyse des résultats bibliographiques a révélé une différence considérable entre les huiles d'argane non-torréfiées et torréfiées. Pour β -tocophérol, une valeur supérieure à celle de la norme, qui tolère au niveau des huiles torréfiées 5 mg/kg comme valeur supérieure, a été enregistrée (6 mg/kg) dans les travaux de Gharby *et al.*, (2012). La même équipe a mentionné une valeur de 4 mg/kg pour l'huile non-torréfiée.

Les travaux de Kharbach *et al.*, (2017), Aithammou *et al.*, (2019), Elgadi *et al.*, (2021c) ont montré des valeurs dépassant la limite supérieure établie par la norme marocaine (900 mg/kg) pour les tocophérols totaux. A cet effet, la différence enregistrée a atteint jusqu'à 300 mg/kg. Nos résultats (Elgadi *et al.*, 2021c) ont montré ce fort potentiel qui renforce la qualité et la notoriété des huiles d'argane. Ce résultats nous interpelle à prendre en considération dans la norme les sites et les régions ayant ces performances étant donné que la composition en tocophérols est fortement influencée par l'origine géographique (Elgadi *et al.*, 2021c).

Tableau 3 : Composition en acides gras des huiles d'argane torréfiées

Technique d'extraction	Technique d'analyse+type de colonne	Nombre d'échantillons	Zone d'étude	Année	Acide Myristique (C14:0)	Acide pentadécanoïque (C15:0)	Acide palmitique (C16:0)	Acide palmitoléique (C16:1)	Acide heptadécanoïque (C17:0)	Acide stéarique (C18:0)	Acide oléique (C18:1 W9)	Acide linoléique (C18:2)	Acide linoléique (C18:3)	Acide arachidique (C20:0)	Acide gadoléique (C20:1)	Acide béhénique (C22:0)	Référence
			SNIMA (huile d'argane)	2016	≤0,2	≤0,1	11,5-15,0	≤0,2	Traces	4,3-7,2	43,0-49,1	29,3-36	≤0,3	≤0,5	≤0,5	≤0,2	(SNIMA, 2016)
			COI (huile d'olive)	2019	-	-	7,5-20,0	0,3-3,5	≤0,4	0,5-5,0	55,0-83,0	2,5-21,0	≤1,0	≤0,6	≤0,5	-	(International Olive Council, 2021)
Torréfaction traditionnelle et extraction par presse mécanique coopérative (Komet DD85G-IBG Montforts Oekotec GmbH)	CPG, HP PEG colonne (30 m × 0.32 mm i.d.)	19	Essaouira, Oujda, Agadir, Taroudant	2005	0,12	0,04	12,45	0,04	0,08	5,44	47,11	33,53	0,09	0,36	0,44	0,11	(Hilali <i>et al.</i> , 2005)
Extraction par Komet DD 85 G press (IBG Monforts Oekotec GmbH & Co. KG, Mönchengladbach, Germany)-coopérative	CPG, CP- Wax 52CB colonne (30 m x 0.25 mm)	4	Ait Baha, Tidzi, Tiout	2012	-	-	12,1-13,2	-	-	5,5-6,4	45,3-48,4	32,3-34,1	0,1	-	-	-	Gharby <i>et al.</i> , 2011
Extraction par presse mécanique coopérative	CPG, 6890 Agilent Technologies gas chromatograph colonne (100 m×0.25 mm ID x 0.20 µm film)	150	Ait- Baha, Agadir, Essaouira, Tiznit, Taroudant	2019	0,15-0,16	-	11,84-14,67	-	-	4,66-6,84	43,96-48,62	30,13-35,37	0,10-0,29	0,29-0,38	0,32-0,47	-	(Kharbach <i>et al.</i> , 2019)

Tableau 4 : Composition en acides gras des huiles d'argane non-torréfiées

Technique d'extraction	Technique d'analyse+type de colonne	Nombre d'échantillons	Zone d'étude	Année	Acide Myristique (C14:0)	Acide pentadécanoïque (C15:0)	Acide palmitique (C16:0)	Acide palmitoléique (C16:1)	Acide heptadécanoïque (C17:0)	Acide stéarique (C18:0)	Acide oléique (C18:1 W9)	Acide linoléique (C18:2)	Acide linoléique (C18:3)	Acide arachidique (C20:0)	Acide gadoléique (C20:1)	Acide béhénique (C22:0)	Référence
Extraction hexanique par soxhlet	CPG, HP PEG colonne (30 m × 0.32 mm i.d.)	19	Essaouira, Oujda, Agadir, Taroudant	2005	0,11	0,05	12,75	0,08	0,08	6,12	47,64	31,73	0,08	0,44	0,49	0,17	Hilali <i>et al.</i> , 2005
Presse mécanique coopérative (Komet DD85G-IBG Montforts Oekotec GmbH)	CPG, HP PEG colonne (30 m × 0.32 mm i.d.)	19	Essaouira, Oujda, Agadir, Taroudant	2005	0,11	0,04	12,06	0,01	0,08	5,77	47,76	32,69	0,08	0,4	0,47	0,14	Hilali <i>et al.</i> , 2005
Extraction par un fluide supercritique	CPG, Agilent Technologies model 6890N avec colonne TR-CN100 (60m x 0.25mm)	1	Non spécifié	2013	0,3-0,4	-	10,4-14,3	-	-	4,5-6,7	45,4-49	29,2-34,8	1,6-1,7	-	-	-	Taribak <i>et al.</i> ,
Presse mécanique coopérative	CPG, 6890 Agilent Technologies gas chromatograph colonne (100 m×0.25 mm ID x 0.20 µm film)	120	Ait- Baha, Agadir, Essaouira, Tiznit, Taroudant	2017	0,15-0,16	-	11,85 - 14,64	-	-	5,62-6,86	43,93-48,56	30,26-35,41	0,13-0,29	0,29-0,39	0,29 - 0,47	-	Kharbach <i>et al.</i> , 2017
Presse mécanique au laboratoire (Komet CA59G-IBG Monforts Oekotec)	GC, Varian CP 3380 colonne (CP-Wax 52 CB L = 30 m; Φ = 0.25 mm; ø = 0.20µm)	41	Safi, Essaouira, Agadir, Taroudant, Tiznit, Sidi Ifni	2021	-	0,05-0,06	13,83 - 15,85	0,09-0,12	0,01-0,09	5,32-6,31	44,75-48,87	29,19-35,23	0,05-0,13	0,03-0,23	0,04 - 0,24	-	(Elgadi <i>et al.</i> , 2021b)

Tableau 5 : la composition en tocophérols des huiles d'argane torréfiées et non-torréfiées

Nature de l'huile	Technique d'extraction	Technique d'analyse+type de colonne	Nombre d'échantillons	Zone d'étude	Année	α -Tocopherols	β -tocopherol	γ -tocopherol	δ -tocopherol	Tocopherol Totaux	Référence
					2016	2,4-6,5% (18-75 mg/kg)	0,1-0,3% (1-5 mg/kg)	81,0-92,0% (640-810 mg/kg)	6,2-12,8% (54-110 mg/kg)	600-900mg/kg	(SNIMA, 2016)
Torréfiée	Torréfaction traditionnelle et extraction par presse mécanique coopérative (Komet DD85G-IBG Montforts Oekotec GmbH)	HPLC méthode d'AOCS, CE 8-89 avec detecteur Shimadzu fluorescence et colonne de silice (250 × 4 mm)	19	Essaouira, Oujda, Agadir, Taroudant	2005	26,6	0	631	59,5	717,4	(Hilali <i>et al.</i> , 2005)
	Torréfaction (110°C pour 20 min) en utilisant SMIR roaster (Technotour, Agadir, Morocco). Extraction par Komet DD 85 G press (IBG Monforts Oekotec GmbH & Co. KG, Mönchengladbach, Germany).	HPLC méthode d'AOCS, CE 8-89 avec detecteur Shimadzu fluorescence et colonne de silice C18 Varian (250 × 4 mm)	2	Taroudant	2012	59	6	531	51	675	(Gharby <i>et al.</i> , 2012)
Non-torréfiée	Extraction hexanique par soxhlet	HPLC méthode d'AOCS, CE 8-89 avec detecteur Shimadzu fluorescence et colonne de silice (250 × 4 mm)	19	Essaouira, Oujda, Agadir, Taroudant	2005	49,3	0	545,9	38,7	633,9	(Hilali <i>et al.</i> , 2005)
	Presse mécanique coopérative (Komet DD85G-IBG Montforts Oekotec GmbH)	HPLC méthode d'AOCS, CE 8-89 avec detecteur Shimadzu fluorescence et colonne de silice (250 × 4 mm)	19	Essaouira, Oujda, Agadir, Taroudant	2005	32,7	0	621,1	50,9	704,7	(Hilali <i>et al.</i> , 2005)

Presse mécanique coopérative (Komet DD 85 G -IBG Monforts Oekotec GmbH & Co. KG, Mönchengladbach, Germany).	HPLC méthode d'AOCS, CE 8-89 avec détecteur Shimadzu fluorescence et colonne de silice C18 Varian (250 × 4 mm)	2	Taroudant	2012	55	4	559	56	683	(Gharby <i>et al.</i> , 2012)
Presse mécanique coopérative	HPLC méthode AOCS, Ce8-89, Agilent HPLC system (1100 series, Germany) avec fluorescence détecteur; Colonne C18-Varian (25 cm × 4.6 mm).	120	Ait- Baha, Agadir, Essaouira, Tiznit, Taroudant	2017	25,01-69,86	1,21-4,56	664,44-802,36	58,55-104,36	772,34- 919,26	(kharbach <i>et al.</i> , 2017)
Extraction par presse mécanique coopérative	NP-HPLC- FLD Shimadzu CR8A avec colonne Varian Inertsil 5SI (250 mm×4.6 mm, 5 µm particle size; Varian Inc.) détecteur fluorescence	10	Agadir	2019	39,52-61,87	0	621,87- 850	36,42- 132,13	700,3- 1068,0	(Aithammou <i>et al.</i> , 2019)
Presse mécanique au laboratoire (Komet CA59G-IBG Monforts Oekotec)	HPLC méthode ISO 9936, détecteur RF- 10AXL HPLC Fluorescence (Shimadzu, Columbia, MD, USA) et Colonne LiChrospher Si 60 (L=250mm, Φ= 4.6mm)	39	Safi, Essaouira, Agadir, Taroudant, Tiznit, Sidi Ifni	2021	48-84	0	657- 1120	41-102	783- 1271	(Elgadi <i>et al.</i> , 2021c)

V. Conclusions

Cette étude critique de la norme marocaine N.M.08.5.090 des huiles d'argane, qui dans son état actuel s'inspire de la norme commerciale de l'huile d'olive, montre la nécessité de sa révision et son adaptation aux seules performances des huiles d'argane.

Sur la base du potentiel réel des huiles d'argane, torréfiée ou non-torréfiée, les paramètres de qualité doivent être revus, notamment l'acidité, IP et l'extinction spécifique à 232 nm.

Les performances de certains acides gras (C16:0 et C18:3) et la composition en tocophérols doivent être également revus au niveau de cette norme. Certainement, d'autres composés de pureté doivent être revus pour la confirmation de leurs résultats et leur conformité avec les limites de la norme.

A l'instar du casier oléicole national, l'arganier doit avoir son casier. Ce dernier réside dans une étude exhaustive de la composition chimique et organoleptique des huiles d'argane, en prenant en considération l'ensemble du territoire de l'arganier et les différentes conditions de son obtention. Sur la base de cette étude deux chantiers vont être abordés avec sérénité, d'une part la révision de la norme marocaine qui sera en mesure d'intégrer le vrai potentiel des huiles d'argane et d'autre part, la discussion de la possibilité d'intégrer les performances de cette norme dans la norme du Codex relative aux les huile spécifiques.

Références

- Aithammou, R., Harrouni, C., Aboudlou, L., Hallouti, A., Mlouk, M., Elasbahani, A., & Daoud, S. (2019). Effect of clones, year of harvest and geographical origin of fruits on quality and chemical composition of Argan oil. *Food Chemistry*, 297(April), 124749. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.024>
- Charrouf, Z., & Guillaume, D. (2008). Argan oil: Occurrence, composition and impact on human health. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 110(7), 632–636. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200700220>
- Elgadi, S., Ouhammou, A., Taous, F., Zine, H., Papazoglou, E. G., Elghali, T., Amenjou, N., Allali, H. El, Aitlhaj, A., & Antari, A. El. (2021). Combination of Stable Isotopes and Fatty Acid Composition for Geographical Origin Discrimination of One Argan Oil Vintage. *Foods*, 10(6), 1–13.
- Elgadi, S., Ouhammou, A., Zine, H., Maata, N., Aitlhaj, A., El Allali, H., & El Antari, A. (2021). Discrimination of Geographical Origin of Unroasted Kernels Argan Oil (*Argania spinosa* (L.) Skeels) Using Tocopherols and Chemometrics. *Journal of Food Quality*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8884860>
- Gharby, S., Harhar, H., Guillaume, D., Haddad, A., & Charrouf, Z. (2012). The origin of virgin argan oil's high oxidative stability unraveled. *Natural Product Communications*, 7(5), 621–624. <https://doi.org/10.1177/1934578x1200700520>
- Gharby, S., Harhar, H., Guillaume, D., Haddad, A., Matthäus, B., & Charrouf, Z. (2011). Oxidative stability of edible argan oil: A two-year study. *LWT - Food Science and Technology*, 44(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.07.003>
- Gharby, S., Harhar, H., Roudani, A., Chafchaouni, I., Charrouf, Z., Chimie, L. De, Synthèse, D., Sciences, F., V-agdal, U. M., Rabat, B. P., Autonome, E., & Contrôle, D. (2013). *Stability oxidative from cosmetic and alimentary argan oil Of thermal treatments*. 2(5), 41–46.
- Harhar, H., Gharby, S., Kartah, B., El Monfalouti, H., Guillaume, D., & Charrouf, Z. (2011). Influence of Argan Kernel Roasting-time on Virgin Argan Oil Composition and Oxidative Stability. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66(2), 163–168. <https://doi.org/10.1007/s11130-011-0220-x>
- Hilali, M., Charrouf, Z., Soulhi, A. E. A., Hachimi, L., & Guillaume, D. (2005). Influence of origin and extraction method on argan oil physico-chemical characteristics and composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(6), 2081–2087. <https://doi.org/10.1021/jf040290t>
- International Olive Council. (2021). IOC. *Determination of the Sterol Composition and Content and Alcoholic Compounds by Capillary Gas Chromatography.*, COI/T.15/NC n° 3/Rév. 17.
- Institut Marocain de Normalisation (2022). Application des normes dans les marchés publics Available online: [APPLICATION DES NORMES DANS LES MARCHES PUBLICS | IMANOR](#) (accessed on 12 Avril 2022).
- Kharbach, M., Kamal, R., Bousrabat, M., Alaoui Mansouri, M., Barra, I., Alaoui, K., Cherrah, Y., Vander Heyden, Y., & Bouklouze, A. (2017). Characterization and classification of PGI Moroccan Argan oils based on their FTIR fingerprints and chemical composition. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 162(February), 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2017.02.003>
- Kharbach, M., Kamal, R., Marmouzi, I., Barra, I., Cherrah, Y., Alaoui, K., Heyden, Y. Vander, & Bouklouze, A. (2019). Fatty-acid profiling vs UV-Visible fingerprints for geographical classification of Moroccan Argan oils. *Food Control*. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.07.046>
- SNIMA 08.5.090. (2016). Service de Normalisation Industrielle Marocaine (SNIMA) Huiles d'argane. *Specifications. Norme Marocaine NM 08.5.090 Rabat*.
- Taribak, C., Casas, L., Mantell, C., Elfadli, Z., Metni, R. E., & Martínez De La Ossa, E. J. (2013). Quality of cosmetic argan oil extracted by supercritical fluid extraction from *Argania spinosa* L. *Journal of Chemistry*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/408194>

Discussions générales

Dans ce chapitre nous discuterons d'une manière succincte les différents résultats obtenus dans cette thèse, sachant que chaque chapitre comprend une discussion détaillée, une discussion générale est paru essentielle dans le but de mettre en évidence les relations entre les paramètres écologiques, la composition floristique et les compositions chimique et isotopique. Sur la base de nos résultats des marqueurs chimiques et biologiques spécifiques pour chaque provenance étudiée ont été déterminés.

I. Relation entre la composition floristique et les modalités des variables des arganeraies centro-occidentales

Le premier chapitre de cette thèse a mis en évidence les relations entre les groupements végétaux et leurs modalités des variables physique, climatique et bioclimatique à l'égard de leur origine géographique (Fig. 1). L'ensemble des relations se résume comme suit :

- **Arganeraies à climat littoral**

Elles sont principalement issues des provinces de **Safi (G1)** et **Agadir (G3)**, ces provinces se caractérisent par des altitudes faibles (<200m) et par une forte influence océanique qui se manifeste par des taux d'humidité relative de l'air élevés (65%). En général, le bioclimat dominant dans ces zones est le semi-aride chaud à très chaud. La végétation présente dans ces origines géographiques se compose essentiellement par *Searsia pentaphylla*, *Withania frutescens*, *Retama monosperma*, *Chamaerops humilis*, *Chamaecytisus albidus* et *Ballota hirsuta*.

- **Arganeraies de transition à climat littoral à semi-continentale**

Les points relevés des provinces d'**Essaouira** et de **Sidi Ifni** présentent des zones de transition entre le climat littoral et semi-continentale. Généralement, ces provinces se caractérisent par des altitudes plus élevées que celle des zones littorales (300m à 700m). Les précipitations sont de l'ordre de 200-300 mm à **Essaouira**, mais plus faibles à **Sidi Ifni** (100 à 200 mm) sous l'effet de la latitude. L'humidité relative de l'air variant de 50% à 65% à **Sidi Ifni** et de 60% à 65% à **Essaouira**. Pour les types de formation végétale, il s'agit d'une arganeraie dominée, à **Essaouira (G2)**, par la strate buissonnante représentée par *Asparagus albus* L., *Lavandula multifida* L. et *Thymus broussonetii*, d'un nanophanérophyte, *Lycium intricatum* et d'une liane, *Ephedra altissima*. Quant à **Sidi Ifni (G7)**, la dominance d'espèces d'Euphorbes cactoïdes est remarquable, représentées par des espèces macaronésiennes, cas de *Kleinia anteuophorbium*, et d'espèces saharo-occidentales atlantiques dont *Euphorbia officinarum* subsp. *officinarum*, *Euphorbia officinarum* subsp. *echinus* et *Euphorbia regis-jubae*.

- **Arganeraies à climat semi-continentale**

Les points relevés appartenant au climat semi-continentale sont inclus essentiellement dans la région d'**Ida Outanane** et la province de **Tiznit**. Les altitudes les plus fréquentes sont observées dans la tranche 700m à 1400m et 300m à 900m respectivement. Pour les précipitations, la tranche 100mm à 200mm est quasi dominante à **Tiznit** ; mais à **Ida Outanane**,

elles se concentrent essentiellement dans la tranche 200 mm – 300 mm, voire même supérieures à 400mm. Le taux de l'humidité relative de l'air est inclus dans l'intervalle 45% - 50% ; Les deux provinces présentent des températures maximales élevées (35°C à 40°C) et des températures minimales faibles (3°C à 7°C). Le bioclimat est de type aride doux essentiellement à **Tiznit** et de type aride frais à tempéré et semi-aride frais à tempéré à **Ida Outanane**.

Au point de vue de la végétation, il s'agit d'une arganeraie marquée par des espèces xérophiles, cas de *Launaea arborescens*, *Haloxylon scoparium* et *Withania adpressa* à **Tiznit (G6)**. A **Ida Outanane (G4)** se présente une arganeraie plus ou moins mésothermophile représentée par l'olivier marocain, *Olea europaea subsp. maroccana*, *Ceratonia siliqua*, la liane, *Periploca angustifolia* et *Globularia alypum*, espèce héliophile des clairières.

- **Arganeraies à climat continental**

Les arganeraies de la province de **Taroudant (G5)** sont caractérisées par un climat continental strict. Au point de vue altitudinale, ces points s'étalent de 300 m à 1400 m. Les précipitations sont concentrées dans la tranche 200 m à 300m. L'humidité relative de l'air est faible allant de 39% à 45%. Les températures minimales sont exceptionnelles allant des températures négatives ($m < 0^{\circ}\text{C}$), jusqu'aux variantes fraîche (0°C à 3°C) et douce (3°C à 5°C). Les bioclimats étudiés dans cette zone s'encartent dans l'Aride froid, frais et doux. Les espèces caractéristiques relevées dans cette province à *Acacia gummifera*, *Launaea arborescens*, *Salvia aegyptiaca*, *Ziziphus lotus* et *Pistacia atlantica*, représentant un cortège de plantes xérophiles.

Les relations étroites entre les facteurs abiotiques et le cortège floristique que présente l'écosystème de l'arganier sont confirmées par plusieurs auteurs Emberger, 1939 ; Benabid 1976 ; Barbéro *et al.*, 1982 ; Peltier, 1982 ; Médail & Quézel, 1999 ; Msanda 2005...

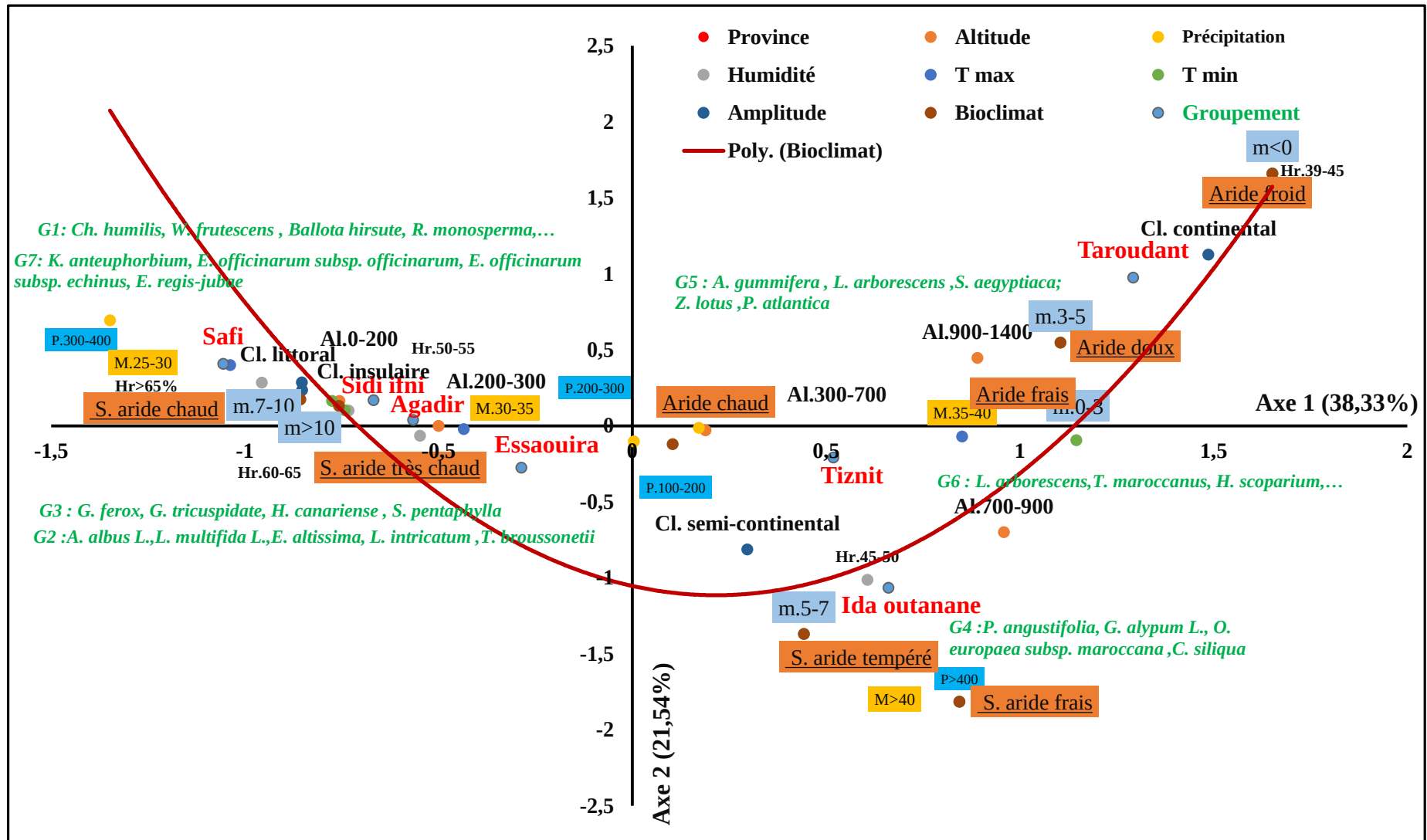


Figure 1. Ordination des provinces - région et des groupements végétaux des arganeraies en fonction des modalités physiques, climatiques et bioclimatiques.

II. Relation entre les modalités des variables et la composition chimique

Les facteurs abiotiques sont les informations de base de chaque milieu. La longitude, la latitude et l'altitude sont les premières informations collectées du terrain. Ces dernières sont ensuite complétées par les facteurs climatiques qui jouent un rôle très important dans la répartition des végétaux. Afin de protéger l'origine géographique des huiles d'argane, il était question de déterminer les liens entre la composition chimique de cette dernière en relation avec les variables géographique, climatique et bioclimatique. Pour cela la corrélation de Pearson a été appliquée sur la matrice de données analysée (Fig. 2).

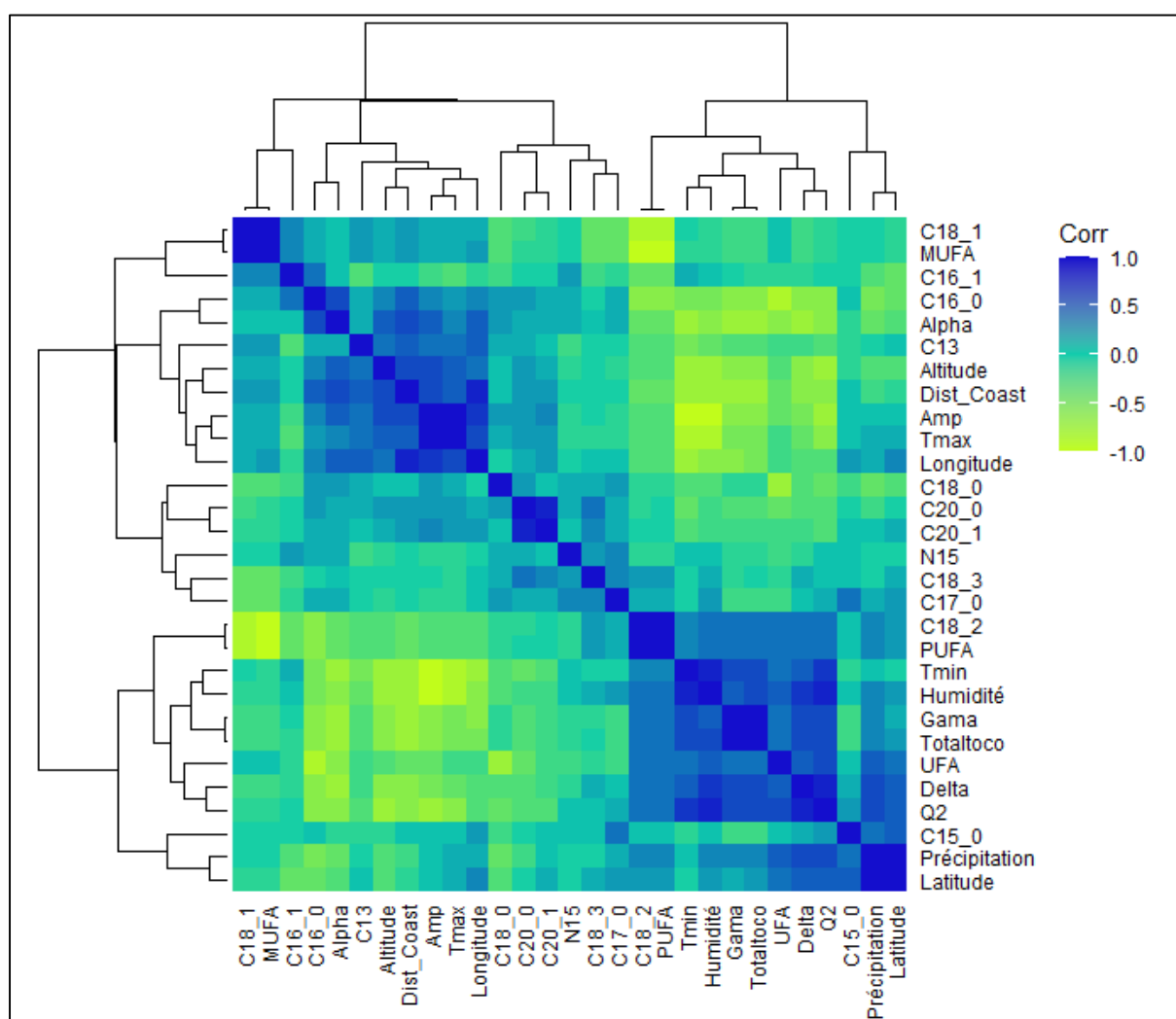


Figure 2. Corrélation de Pearson et classification hiérarchique des modalités des variables géographique, climatique et bioclimatique, les compositions chimique et isotopique

En analysant la figure 2, plusieurs corrélations positives et négatives apparaissent ainsi qu'un rapprochement clair entre les modalités des variables et la composition chimique. La classification hiérarchique a donnée 4 groupes : **le premier groupe** correspond à l'acide oléique

(C18:1), les acides gras mono-insaturés et l'acide palmitoléique (C16:1). Ce groupe présente des corrélations positives avec la longitude et la distance de la mer. **Le groupe 2** réunit les variables abiotiques et la composition chimique et isotopique. Ce groupe met en évidence plusieurs corrélations positives significatives entre l'acide palmitique (C16:0), l' α -tocophérol et le $\delta^{13}\text{C}$ d'une part et l'altitude, la distance de la mer, l'amplitude thermique, la température maximale et la longitude d'autre part. Il présente également des corrélations significatives négatives avec la température minimale et l'humidité relative de l'air. **Le groupe 3** rassemble les composants chimiques et isotopiques qui ont des corrélations faibles à nulles, il s'agit des acides heptadécanoïque (C17:0), stéarique (C18:0), arachidique (C20:0), gadoléique (C20:1) et $\delta^{15}\text{N}$. **Le groupe 4** met en évidence les corrélations entre les modalités des variables et la composition chimique notamment les acides pentadécanoïque (C15:0) et linoléique (C18:2), δ et γ - tocophérol, les tocophérols totaux, les acides gras insaturés, en plus de la température minimale, l'humidité relative, les précipitations et la latitude. Les corrélations de ce groupe sont significatives et positives.

D'après la bibliographie, plusieurs recherches concernant la composition chimique de l'huile d'argane torréfiée et non-torréfiée existent néanmoins les études concernant les relations entre les modalités des variables et la composition chimique sont faibles. Cette approche aidera à établir une base pour protéger l'origine géographique.

Hilali *et al.*, (2020) ont indiqué que l'effet du génotype n'est pas le seul responsable de la composition chimique de l'huile d'argane ; l'origine et les conditions climatiques ont également un effet sur sa composition chimique. Les résultats obtenus ont montré que les modalités des variables géographique, climatique et bioclimatique sont corrélées de manière significative avec la composition chimique. De même, Ait Aabd *et al.*, (2013) et Kharbach *et al.*, (2018) ont signalé que les niveaux d'acide oléique (C18:1) ont augmenté avec des précipitations élevées et ceux de l'acide linoléique (C18:2) avec l'altitude. La variabilité globale de la composition en acides gras de l'huile d'argane peut être attribuée à divers facteurs, notamment l'origine géographique et le climat (Aithammou *et al.*, 2019).

III. Relation entre la composition floristique et la composition chimique

Comme déjà mentionné, la présence d'un type de groupement végétal spécifique à un milieu est conditionnée par les paramètres géographiques et pédoclimatiques locaux. D'autre part, nos résultats ont mis en évidence la présence des relations entre la composition chimique et les modalités des variables géographique, climatique et bioclimatique. On en déduit qu'il existe une relation évidente entre les compositions floristique et chimique des huiles d'argane.

Les résultats des marqueurs chimiques et isotopiques ont été transformés en 47 modalités, additionnées aux 46 espèces caractéristiques individualisées au sein des provinces et régions étudiées ont fait l'objet d'une analyse en AFC. La liste floristique est considérée comme des éléments de base alors que les modalités chimiques et isotopiques sont les éléments explicatifs (Fig. 3).

En analysant la figure 3, nous remarquons l'existence d'un effet de Gutmann qui confirme la présence des relations entre les provinces, le cortège floristique et la composition chimique. Les axes 1 et 2 de l'AFC présentent 57,73% de l'inertie totale. L'axe 1 met en évidence la présence d'un gradient nord-sud avec 35,86% de l'inertie totale. La province de **Safi** se situe sur la partie négative de l'axe 1, son cortège floristique est composé, d'espèce thermophiles : *Chamaerops humilis*, *Withania frutescens*, *Ballota hirsuta*, *Retama monosperma*, et *Chamaecytisus albidus*, et les huiles extraites indiquent la présence de l'acide oléique (C18:1) avec un pourcentage compris entre 44 et 45%, et l'acide linoléique (C18:2) supérieure à 35%. Concernant les tocophérols, cette province est caractérisée par un taux de δ -tocophérol supérieur à 88 mg/kg. La province d'**Essaouira** se caractérise par la présence d'*Asparagus albus*, *Lavandula multifida*, *Ephedra altissima*, *Lycium intricatum* et *Thymus broussonetii* comme espèces caractéristiques. Ces dernières peuvent être considérées comme des marqueurs biologiques indiquant la composition chimique des huiles d'**Essaouira**. Les acides stéarique (C18:0) et linoléique (C18:2) varient de 3 à 5% et de 32 à 33% respectivement. Alors que les α -Tocopherols, δ -tocophérols et γ -tocophérols des huiles d'**Essaouira** oscillent entre 42 et 52 mg/kg, 77 et 88 mg/kg, 800 et 900mg/kg respectivement. L'isotope $\delta^{13}\text{C}\%$ varie entre -29 et -28‰. *Periploca angustifolia*, *Tetraclinis articulata*, *Olea europaea* subsp. *maroccana*, et *Globularia alypum* présentent un cortège floristique caractérisant la région d'**Ida Outanane** permettant ainsi la prédiction de la composition chimique. Les huiles issues de la région d'Ida Outanane se caractérisent par des concentrations variant de 48 à 49% et 31 à 32% pour l'acide oléique (C18:1) et linoléique (C18:2) respectivement. La concentration en δ -tocophérol est

comprise entre 66 et 77 mg/kg. Alors que le $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ balance entre -28 et -27‰. La partie positive de l'axe 1 et négative de l'axe 2 réunit les provinces du sud de la zone d'étude. **Taroudant** est la province la plus continentale, elle se caractérise par la présence de : *Acacia gummifera*, *Salvia aegyptiaca*, *Ziziphus lotus*, et *Pistacia atlantica*. L'huile d'argane de cette province est définie par des concentrations variant de 82 à 92 mg/kg d' α -Tocophérol, 500 à 600 de γ -tocopherol et 33 à 44 de δ -tocopherol. L'acide palmitique (C16:0) est élevé par rapport aux autres provinces, dépassant 16%. Le pourcentage de l'acide linoléique (C18:2) est compris entre 26 et 28%. L'isotope ^{13}C varie de -27 à -26‰. Les huiles appartenant aux provinces de Tiznit et Taroudant présentent des similarités du point de vue composition chimique. Pourtant, la province de **Tiznit** se distingue par la présence des concentrations plus élevées en γ -tocopherol et δ -tocopherol variant de 700 à 800 mg/kg et de 55 à 66 mg/kg respectivement. Cependant, l' α -Tocopherol est faible (72-82 mg/kg). La teneur en ^{13}C balance entre -28 et -27‰. Ces propriétés chimiques peuvent être marquées par la présence de *Launaea arborescens*, *Thymus maroccanus* et *Haloxylon scoparium*. La province de **Sidi Ifni** est caractérisée par une flore succulente typique de cette province : *Kleinia anteuphorbium*, *Euphorbia officinarum* subsp. *echinus* et *Euphorbia regis-jubae*. L'huile d'argane extraite à partir des arganeraies de **Sidi Ifni** varie de 47 à 48% et de 33 à 34% de l'acide oléique (C18:1) et l'acide linoléique (C18:2) respectivement. Les concentrations des tocophérols sont comprises entre 44 et 55 mg/kg pour δ - tocophérol et 900 et 1000 mg/kg pour γ -tocophérol. L'isotope ^{13}C présente les plus faibles valeurs (-31 à -29‰). L'annexe 3 résume les marqueurs les plus spécifiques de chaque province-région étudiée.

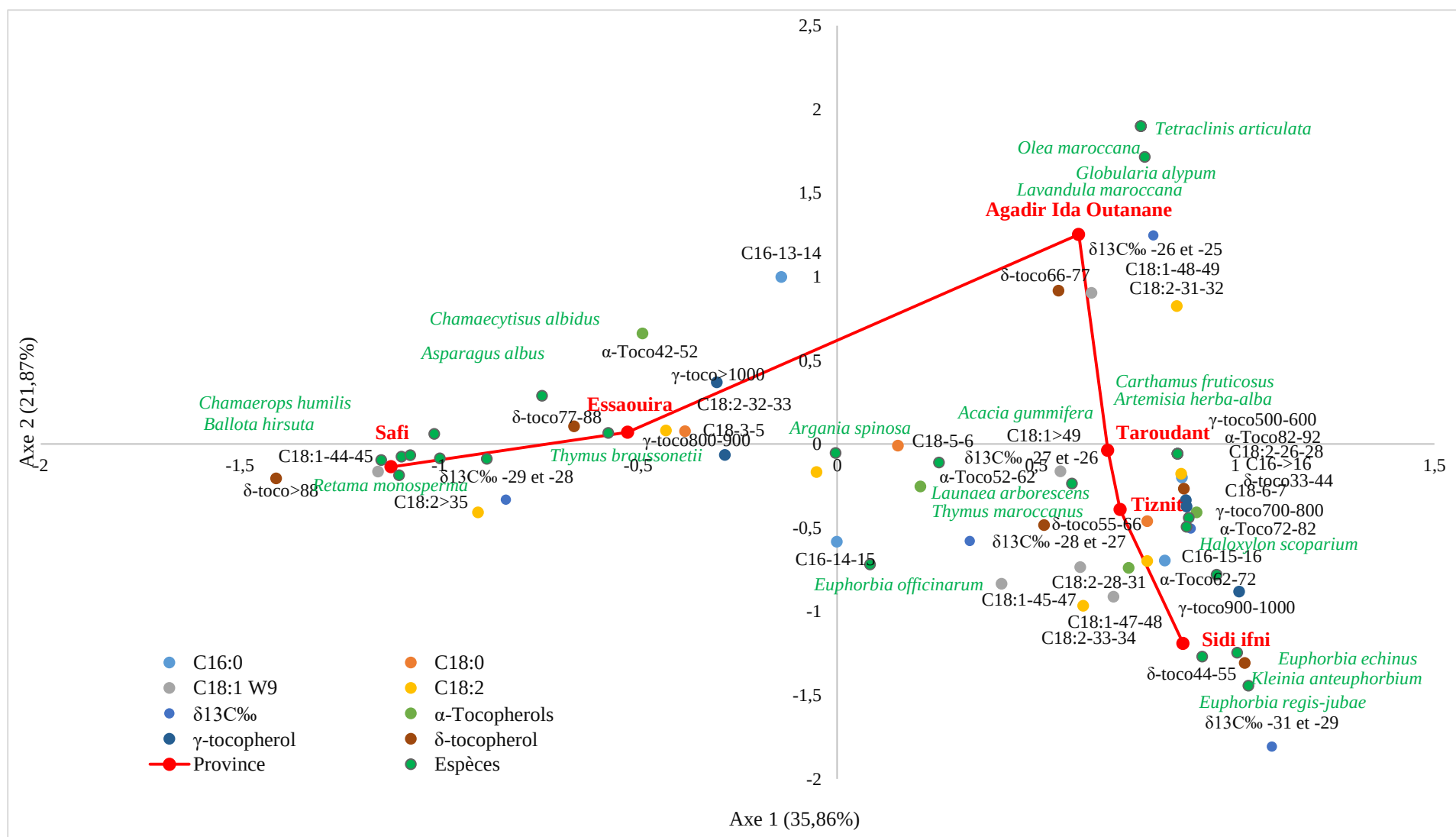


Figure 3. Ordination en AFC de la composition floristique de chaque province en fonction de la composition chimique et isotopique.

Références

- Ait Aabd N, El Asbahani A, El Alem Y, El Finti A, Msanda F, El Mousadik A. 2013. Variation in oil content and fatty acid composition in preselected argan trees with morphological characters and geographical localization. *Mediterr J Nutr Metab* 6(3): 217–225. <https://doi.org/10.1007/s12349-013-0134-2>.
- Aithammou R, Harrouni C, Aboudlou L, et al. 2019. Effect of clones, year of harvest and geographical origin of fruits on quality and chemical composition of argan oil. *Food Chem* 297: 124749. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.024>.
- Barbero, M., Benabid, A., Quézel, P., Rivas-Martínez, S., & Santos, A. (1982). Contribution à l'étude des Acacio-Arganietalia du Maroc sud-occidental. *Documents phytosociologiques. Nouvelle série Bailleul Nord Dépt*, 6, 331-338.
- Benabid A. (1976). Etude écologique, phytosociologique et sylvopastorale de la tétraclinaie de l'Amsittène. Thèse de 3ème cycle, Université Aix-Marseille III, 1976, 155 p.
- Emberger, L. (1939). Aperçu général sur la végétation du Maroc: commentaire de la carte phytogéographique du Maroc 1: 1.500. 000. Berne: H. Huber. 157 p.
- Hilali M, Kartah BE, El Monfalouti H. 2020. Evaluation of the chemical composition of argan (*Argania spinosa* L.) oil according to its extraction method, origin of production and altitude. *JWPR* 10(3): 111–118. <https://doi.org/10.36380/scil.2020.ojaf15>.
- Kharbach, M., Kamal, R., Bousrabat, M., Alaoui Mansouri, M., Barra, I., Alaoui, K., Cherrah, Y., Vander Heyden, Y., & Bouklouze, A. (2017). Characterization and classification of PGI Moroccan Argan oils based on their FTIR fingerprints and chemical composition. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 162(February), 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2017.02.003>
- Médail F. et Quézel P. (1999). The phytogeographical significance of S.W. Morocco compared to the Canary Islands. *Plant Ecology* 140: 221-244.
- Msanda, F.; El Aboudi, A.; Peltier, J.-P. (2005). Biodiversité et biogéographie de l'arganeraie marocaine. *Agriculture* 2005, 14, 357–364
- Peltier J.P. (1982). La végétation du bassin versant de l'oued Souss (Maroc). Thèse de doctorat és-sciences. Université scientifique et médicale de Grenoble, 201p.

Conclusions générales et perspectives

L'approche pluridisciplinaire développée dans ce travail de thèse a permis de mettre en place des lignes méthodologiques de détection de l'origine géographique en combinant multiples aspects : étude floristico-écologique, et analyses chimique et isotopiques combinées aux analyses multivariées et au SIG pour détecter et protéger l'origine géographique des huiles d'argane non-torréfiée de la zone du centre ouest marocain.

Le chapitre 1 a présenté une analyse phyto-écologique multidimensionnelle des types d'arganeraies étudiées. Cette analyse a permis le diagnostic de la flore pérenne caractéristique exprimée en fréquence dans chaque zone de prélèvement. A cet effet, nous avons déterminé les groupements végétaux et la mise en valeur des relations entre les paramètres abiotiques et la répartition des plantes vasculaires associées de l'arganier. En fait, l'origine géographique a une action directe sur les paramètres climatiques et par conséquent sur la végétation. Les résultats de ce chapitre ont permis la détermination des marqueurs biologiques des types d'arganeraie de chaque province. La province de Safi est caractérisée par *Chamaerops humilis*, *Withania frutescens*, *Ballota hirsuta*, *Retama monosperma* et *Chamaecytisus albidus*. La province d'Essaouira est marquée essentiellement par la présence d'*Asparagus albus*, *Lavandula multifida*, *Ephedra altissima*, *Lycium intricatum* et *Thymus broussonetii*. La région d'Ida Outanane est définie par la présence de *Periploca angustifolia*, *Tetraclinis articulata*, *Olea europaea subsp. maroccana* et *Globularia alypum*. Alors que l'*Acacia gummifera*, *Salvia aegyptiaca*, *Ziziphus lotus* et *Pistacia atlantica* sont les marqueurs biologiques de la province de Taroudant. La province de Tiznit est caractérisée par *Launaea arborescens*, *Thymus maroccanus* et *Haloxylon scoparium*. La province de Sidi Ifni est typiquement marquée par le groupement composé de: *Kleinia antephorbium*, *Euphorbia officinarum subsp. echinus* et *Euphorbia regis-jubae*.

Les résultats obtenus dans le chapitre 2 mettent en évidence le potentiel réel en tocophérols de l'huile d'argane qui varie de 844,05 à 1271,68 mg/kg d'huile. L'impact de l'origine géographique sur la teneur en tocophérol a été déterminé en combinant plusieurs analyses statistiques comme la corrélation de Pearson, l'ACP et la LDA. L'analyse de corrélation de Pearson a montré que la distance de la mer, la latitude et l'altitude présentent une forte corrélation avec la majorité des homologues du tocophérol. L'ACP a également révélé une distinction entre les provinces et a confirmé l'impact de l'origine géographique sur la concentration des tocophérols. La capacité de prédiction des modèles LDA était de 87,2% ce

qui confirme le pouvoir prometteur particulièrement de l' α -tocophérol et le γ -tocophérol pour la protection de l'origine géographique.

La combinaison des profils d'acides gras et d'isotopes stables (chapitre 3) est un outil très prometteur pour contrôler l'origine géographique et par conséquent le signe distinctif d'origine et qualité, l'Indication Géographique Protégée (IGP). Les isotopes stables, notamment $\delta^{13}\text{C}$, et les acides gras C16:0, C18:2, les acides gras insaturés et saturés, ont montré plusieurs relations avec les paramètres géographiques. Par conséquent, ils peuvent être considérés comme des marqueurs géographiques fiables.

Comme perspective, nous proposons de comparer les arganiers naturels et ceux des reboisements (arganiculture) en considérant d'autres paramètres de pureté pour mieux affiner et renforcer les modèles prédictifs de l'origine géographique.

Dans le chapitre 1, il a été évoqué que les arganeraies du centre ouest Marocain englobe plusieurs espèces patrimoniales, endémiques, aromatiques, médicinales et nutritionnelles. Le chapitre 4 compare pour la première fois la composition chimique des deux sous espèces d'olivier : *Olea europaea* var. *sylvestris* et *Olea europaea* ssp. *maroccana*. Cette dernière est endémique du Maroc et cohabite avec l'arganier des Ida Outanane. Une différence significative a été détectée au niveau des acides gras, notamment en acide linoléique (acides gras essentiels) de l'huile de ssp. *maroccana* qui s'est avérée plus élevée que celui de l'huile de var. *sylvestris*. En outre, la teneur en α et β -tocophérols ainsi que la teneur en phytostérols distinguent l'huile de ssp. *maroccana* par rapport à var. *sylvestris*. Par conséquent, pour mieux exploiter cette phytoressource naturelle, des études supplémentaires sur d'autres paramètres de qualité et de pureté sont nécessaires pour compléter la caractérisation et identifier le potentiel et les performances de ssp. *maroccana* et var. *sylvestris* dans le centre-ouest du Maroc.

Le chapitre 5 résume l'ensemble des résultats obtenus dans les chapitres précédents en utilisant les systèmes d'information géographique combinée à la carte interactive. Cette plateforme facilitera l'accès aux zones d'arganiers présentées dans cette recherche. Elle permettra également d'approcher les descripteurs du milieu (l'altitude, le climat...) et les compositions chimique et isotopique des huiles d'argane afin de contrôler et protéger l'origine géographique. Cette base est une initiative incitant la réalisation d'une plateforme plus développée incluant la majorité des travaux de recherches sur les différents aspects des études liées aux arganeraies.

Le chapitre 6 a abordé une étude critique de la norme marocaine N.M.08.5.090 des huiles d'argane. Sur la base du potentiel réel des huiles d'argane, torréfiée ou non-torréfiée, les paramètres de qualité doivent être revus, notamment l'acidité, l'indice de peroxyde et l'extinction spécifique à 232 nm. Les performances de certains acides gras (C16:0 et C18:3) et la composition en tocophérols doivent être également revue à travers cette norme. A l'instar du casier oléicole national, l'arganier doit avoir son propre casier. Ce dernier vise l'étude exhaustive de la composition chimique et organoleptique des huiles d'argane, en prenant en considération l'ensemble de l'aire de l'arganeraie marocaine et les différentes conditions de son obtention.

Sur la base de cette étude deux chantiers vont être abordés avec sérénité, d'une part la révision de la norme marocaine qui sera en mesure d'intégrer le vrai potentiel des huiles d'argane marocaines et d'autre part, la discussion de la possibilité d'intégrer les performances de cette norme dans la norme du Codex relative aux les huile portant un nom spécifique.

La discussion générale a mis en évidence des relations entre les paramètres de milieu, le cortège floristique et la composition chimique deux par deux pour mieux décrire et combiner l'ensemble des marqueurs chimiques et biologiques choisis. Dans un autre côté, l' α -tocophérol et le γ -tocophérol, $\delta^{13}\text{C}$, et les acides gras C16:0 et C18:2 ont montré leurs pouvoirs discriminant de l'origine géographique. l'AFC a permis la catégorisation de la composition chimique en fonction du cortège floristique de chaque province. Pratiquement, cette technique permettra de déterminer approximativement les teneurs en composants chimiques de l'huile d'argane à partir des plantes compagnes.

La présente étude apporte une meilleure compréhension de l'impact de l'origine géographique sur la composition chimique et permet d'instaurer une nouvelle notion des marqueurs biologiques qui serviront à déterminer la composition chimique à partir du cortège floristique de chaque arganeraie. Cette dernière est une étude préliminaire et mérite d'être mieux affiner en analysant les différentes interactions entre les plantes vasculaires et l'arbre de l'arganier.

Les résultats de cette thèse peuvent également contribuer à l'établissement et le contrôle du label IGP en raison de l'approche méthodologique vérifiée et simple à appliquer par les laboratoires au profit des industries et coopératives dans le but de valoriser l'huile d'argane à l'échelle nationale et internationale.

Au terme de ce travail, des **perspectives** de recherches peuvent être envisagées :

- Application de la même démarche scientifique du travail sur les arganeraies reboisées et les arganeraies de l'Oued Grou (dans la région de Rabat) et Béni-Snassen (dans la région d'Oujda - Berkane);
- Etude exhaustive de la composition chimique des différents types d'huiles d'argane ;
- Détermination des marqueurs chimiques et isotopiques pour les huiles d'argane torréfiées ;
- Détermination des marqueurs minéralogiques du sol et des huiles afin d'approcher leurs performances dans la prédiction de l'origine géographique ;
- Évaluation de l'impact de la flore et la végétation sur l'arganeraie et la composition chimique des huiles d'argane marocaines ;
- Valorisation et conservation d'autres plantes oléagineuses des arganeraies.

Annexes

Annexe 1. Présentation et localisation des points relevés des arganeraies dans les provinces et régions du Maroc centro-occidental (Tableau complémentaire de la figure 10)

Province	Localité	N° Relevé	Province	Localité	N° Relevé
Safi	Souiria laqdim	R01	Taroudant	Ighrem	R43
Safi	Ghabet echouk	R02	Taroudant	Tiout	R44
Safi	Talmest	R03	Taroudant	Idrgan	R45
Essaouira	Tamanar	R04	Taroudant	Tiout	R46
Essaouira	Ait Daoud	R05	Taroudant	Tiout	R47
Essaouira	Smimou	R06	Taroudant	Tiout	R48
Essaouira	Mejji	R07	Taroudant	Lakhmis N'Arazane	R49
Essaouira	Mramr	R08	Taroudant	Lakhmis N'Arazane	R50
Essaouira	Bouzama	R09	Taroudant	Lakhmis N'Arazane	R51
Essaouira	Mramr	R10	Taroudant	Lakhmis N'Arazane	R52
Essaouira	Sidi kaouki	R11	Taroudant	Lakhmis N'Arazane	R53
Essaouira	Ait said	R12	Tiznit	Arba Sahel	R54
Essaouira	Had dra	R13	Tiznit	Dloune	R55
Essaouira	Mramr	R14	Tiznit	Sidi Ahmed Oumoussa	R56
Agadir	Tamri	R15	Tiznit	Id Aatman	R57
Agadir	Tamri	R16	Tiznit	Ait Bazi	R58
Agadir	Imsouan	R17	Tiznit	Ait Yassine	R59
Ida Outanane	Argana	R18	Tiznit	Amerken	R60
Ida Outanane	Tadart	R19	Tiznit	Ait Moussa	R61
Ida Outanane	Ait Ahmed Ou Brahim	R20	Tiznit	Tarsouat	R62
Ida Outanane	Timsal	R21	Tiznit	Tirhmi	R63
Ida Outanane	Lamnizla	R22	Tiznit	Afoud	R64
Ida Outanane	Ait Hassain	R23	Tiznit	Id Yahya	R65
Ida Outanane	Loumih	R24	Tiznit	Anzi	R66
Ida Outanane	Bigoudine	R25	Tiznit	Tafraout	R67
Ida Outanane	Lamnizla	R26	Tiznit	Adai	R68
Ida Outanane	Lamnizla	R27	Tiznit	Imi Ougni	R69
Ida Outanane	Amalou	R28	Tiznit	Douaate	R70
Ida Outanane	Lamnizla	R29	Tiznit	Tizgui Emassine	R71
Ida Outanane	Tassademt	R30	Tiznit	Ait issafen	R72
Ida Outanane	Bouzmour	R31	Tiznit	Douzrou	R73
Ida Outanane	Agadir imouzgaoun	R32	Tiznit	Idrassan	R74
Agadir	Takate	R33	Sidi ifni	Mesti	R75
Agadir	Ain nekhla	R34	Sidi ifni	Sbouya	R76
Taroudant	Ighrem	R35	Sidi ifni	Tioughza	R77
Taroudant	Tiout	R36	Sidi ifni	El Had N'Befourna	R78
Taroudant	Tiout	R37	Sidi ifni	Tagadirte	R79
Taroudant	Tamsoult	R38	Sidi ifni	Taourirte Dfilia	R80
Taroudant	Tadnest	R39	Sidi ifni	Mesti	R81
Taroudant	Ait maalla	R40	Sidi ifni	Tioughza	R82
Taroudant	Warwad	R41	Guelmim	Bouizakarne	R83
Taroudant	Ighrem	R42			

Annexe 2. Liste des taxons inventoriés dans les points relevés des provinces - régions étudiées

Famille	Espèces	Code	Endémisme	Rareté
Amaranthaceae	<i>Atriplex halimus</i> L.	At.ha	-	LC
	<i>Atriplex semibaccata</i> R.Br.	At.se	-	LC
	<i>Haloxylon solariums</i> Pomel	Ha.sc	-	-
	<i>Polycnemum fontanesii</i> Durieu & Moq.	Po.fo	-	LC
	<i>Salsola oppositifolia</i> Desf.	Sa.op	-	LC
	<i>Salsola vermiculata</i> L.	Sa.ve	-	LC
Anacardiaceae	<i>Pistacia atlantica</i> Desf.	Pi.at	-	LC
	<i>Pistacia lentiscus</i> L.	Pi.le	-	LC
	<i>Searsia pentaphylla</i> (Jacq.) F.A.Barkley	Se.pe	-	LC
	<i>Searsia tripartita</i> (Ucria) Moffett	Se.tr	-	LC
Apiaceae	<i>Eryngium ilicifolium</i> Lam.	Er.il	-	LC
	<i>Eryngium tricuspidatum</i> L.	Er.tr	-	LC
	<i>Thapsia transtagana</i> Brot.	Th.tr	-	LC
	<i>Torilis arvensis</i> subsp. <i>elongata</i> (Hoffmanns. & Link) Cannon	To.ar	-	LC
Apocynaceae	<i>Periploca angustifolia</i> Labill.	Pe.an	-	-
Araceae	<i>Arisarum vulgare</i> O.Targ.Tozz.	Ar.vu	-	-
Arecaceae	<i>Chamaerops humilis</i> L.	Ch.hu	-	-
Asparagaceae	<i>Asparagus albus</i> L.	As.al	-	-
	<i>Asparagus horridus</i> L.	As.ho	-	-
	<i>Asparagus pastorianus</i> Webb & Berthel.	As.pa	-	-
	<i>Drimia maritima</i> (L.) Stearn	Dr.ma	-	-
Brassicaceae	<i>Biscutella didyma</i> L.	Bi.di	-	LC
	<i>Diploaxis catholica</i> (L.) DC.	Di.ca	-	LC
	<i>Eremobium aegyptiacum</i> (Spreng.) Asch. ex Boiss.	Er.ae	-	LC
	<i>Hirschfeldia incana</i> (L.) Lagr.-Foss.	Hi.in	-	LC
	<i>Matthiola parviflora</i> (Schousb.) R.Br.	Ma.pa	-	LC
	<i>Notoceras bicornis</i> (Aiton) Amo	No.bi	-	LC
Campanulaceae	<i>Jasione crispa</i> (Pourr.) Samp.	Ja.cr	-	LC
Capparaceae	<i>Capparis spinosa</i> L.	Ca.sp	-	NA
Caprifoliaceae	<i>Valerianella discoidea</i> (L.) Loisel.	Va.di	-	LC
	<i>Valerianella microcarpa</i> Loisel.	Va.mi	-	LC
Caryophyllaceae	<i>Paronychia arabica</i> (L.) DC.	Pa.ar	-	LC
	<i>Paronychia argentea</i> Lam.	Pa.arg	-	LC
	<i>Paronychia chlorothyrsa</i> Murb.	Pa.ch	-	LC
Cistaceae	<i>Helianthemum canariense</i> (Jacq.) Pers.	He.ca	Endémique du Maroc + Canaries et/ou autres îles macaronésiennes	VU(e)
Cleomaceae	<i>Cleome violacea</i> L.	Cl.vi	Endémique du Maroc et les îles ibériques	LC
Compositae	<i>Anacyclus valentinus</i> L.	An.va	-	LC
	<i>Artemisia herba-alba</i> Asso.	Ar.he	-	DD
	<i>Atractylis cancellata</i> L.	At.ca	-	LC
	<i>Carlina involucrata</i> Poir.	Ca.in	-	LC
	<i>Carthamus fruticosus</i> Maire	Ca.fr	-	-

	<i>Catananche arenaria</i> Coss. & Durieu	Ca.ar	-	LC
	<i>Centaurea sulphurea</i>	Ce.su	-	-
	<i>Centaurea aspera</i> L.	Ce.as	-	NA
	<i>Centaurea pullata</i> L.	Ce.pu	-	LC
	<i>Cladanthus arabicus</i> (L.) Cass.	Cl.ar	-	LC
	<i>Echinops spinosissimus</i> Turra	Ec.sp	-	LC
	<i>Filago germanica</i> (L.) Huds.	Fi.ge	-	LC
	<i>Hypochaeris glabra</i> L.	Hy.gl	-	LC
	<i>Kleinia anteuphorbium</i> (L.) Haw.	Kl.an	Endémique du Maroc	NT
	<i>Launaea arborescens</i> (Batt.) Murb.	La.ar	-	LC
	<i>Leontodon saxatilis</i> Lam.	Le.sa	-	LC
	<i>Onopordum macracanthum</i> Schousb.	On.ma	-	LC
	<i>Phagnalon saxatile</i> (L.) Cass.	Ph.sa	-	LC
	<i>Reichardia tingitana</i> (L.) Roth	Re.ti	-	LC
	<i>Scolymus hispanicus</i> L.	Sc.hi	-	LC
	<i>Tolpis barbata</i> (L.) Gaertn.	To.ba	-	LC
	<i>Trichodesma calcarata</i> Batt.	Tr.ca	-	LC
Cucurbitaceae	<i>Citrullus colocynthis</i> (L.) Schrad.	Ci.co	-	LC
Cupressaceae	<i>Juniperus phoenicea</i> L.	Ju.ph	-	LC
	<i>Tetraclinis articulata</i> (Vahl) Mast.	Te.ar	-	LC
Ephedraceae	<i>Ephedra altissima</i> Desf.	Ep.al	-	LC
	<i>Ephedra fragilis</i> Desf.	Ep.fr	-	LC
	<i>Ephedra major</i> Host	Ep.ma	-	LC
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia dracunculoides</i> Lam.	Eu.dr	Endémique du Maroc	VU(e)
	<i>Euphorbia officinarum</i> subsp. <i>echinus</i> (Hook.f. & Coss.) Vindt	Eu.of	-	LC
	<i>Euphorbia officinarum</i> subsp. <i>officinarum</i>	Eu.of	-	LC
	<i>Euphorbia regis-jubae</i> J.Gay	Eu.re	Endémique du Maroc et Maurétanie	NT
	<i>Euphorbia sulcata</i> Lens ex Loisel.	Eu.su	Endémique du Maroc + Canaries et/ou autres îles macaronésiennes	NT
	<i>Mercurialis annua</i> L.	Me.an	-	LC
Geraniaceae	<i>Erodium meynieri</i> Maire	Er.me	Endémique du Maroc et Algérie	NT
Lamiaceae	<i>Ajuga iva</i> (L.) Schreb.	Aj.iv	-	LC
	<i>Ballota hirsuta</i> Benth.	Ba.hi	-	LC
	<i>Lavandula dentata</i> L.	La.de	-	LC
	<i>Lavandula mairei</i> Humbert	La.mai	Endémique du Maroc	NT
	<i>Lavandula maroccana</i> Murb.	La.mar	Endémique du Maroc	NT
	<i>Lavandula multifida</i> L.	La.mu	-	LC
	<i>Micromeria macrosiphon</i> Coss.	Mi.ma	Endémique du Maroc	VU(e)
	<i>Salvia aegyptiaca</i> L.	Sa.ae	-	LC
	<i>Teucrium capitatum</i> L.	Te.ca	-	LC
	<i>Teucrium polium</i> L.	Te.po	-	LC
	<i>Thymus broussonetii</i> Boiss.	Th.br	Endémique du Maroc	VU(e)
	<i>Thymus maroccanus</i> Ball	Th.ma	Endémique du Maroc	DD
	<i>Vitex agnus-castus</i> L.	Vi.ag	-	LC
Leguminosae	<i>Acacia gummifera</i> Willd.	Ac.gu	Endémique du Maroc	LC
	<i>Anagyris foetida</i> L.	An.fo	-	LC

	<i>Ceratonia siliqua</i> L.	Ce.si	-	LC
	<i>Chamaecytisus albidus</i> (DC.) Rothm.	Ch.al	-	-
	<i>Genista ferox</i> Poir.	Ge.fe	-	-
	<i>Genista tricuspidata</i> Desf.	Ge.tr	-	LC
	<i>Hippocrepis multisiliquosa</i> L.	Hi.mu	-	LC
	<i>Lotus arenarius</i> Brot.	Lo.ar	-	LC
	<i>Medicago laciniata</i> (L.) Mill.	Me.la	-	LC
	<i>Ononis natrix</i> L.	On.na	-	LC
	<i>Ononis ornithopodioides</i> L.	On.or	-	LC
	<i>Retama monosperma</i> (L.) Boiss.	Re.mo	-	LC
Linaceae	<i>Linum strictum</i> L.	Li.st	-	LC
Malvaceae	<i>Malva parviflora</i> L.	Ma.pa	-	LC
Oleacea	<i>Olea europaea</i> subsp. <i>maroccana</i> (Greuter & Burdet) P.Vargas & al.	Ol.eum	Endémique du Maroc	LC
	<i>Olea europaea</i> var. <i>sylvestris</i> (Mill.) Lehr	Ol.eu	-	LC
Plantaginaceae	<i>Globularia alypum</i> L.	Gl.al	-	-
	<i>Kickxia aegyptiaca</i> (L.) Nabelek	Ki.ae	-	-
	<i>Linaria incarnata</i> (Vent.) Spreng.	Li.in	Endémique du Maroc + Canaries et/ou autres îles macaronésiennes et l'Algérie	DD
	<i>Plantago afra</i> L.	Pl.af	-	LC
	<i>Plantago coronopus</i> L.	Pl.co	-	LC
	<i>Plantago lanceolata</i> L.	Pl.la	Endémique du Maroc	DD
Plumbaginaceae	<i>Limonium lobatum</i> (L.f.) Kuntze	Li.lo	-	LC
	<i>Limonium sinuatum</i> (L.) Mill.	Li.si	-	LC
Poaceae	<i>Aristida adscensionis</i> L.	Ar.ad	-	-
	<i>Brachypodium distachyon</i> (L.) P.Beauv.	Br.di	-	-
	<i>Bromus rubens</i> L.	Br.ru	-	-
	<i>Cymbopogon schoenanthus</i> (L.) Spreng.	Cy.sc	-	-
	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	Cy.da	-	-
	<i>Dactylis glomerata</i> L.	Da.gl	-	-
	<i>Hyparrhenia hirta</i> (L.) Stapf	Hy.hi	-	-
	<i>Lamarckia aurea</i> (L.) Moench	La.au	-	-
	<i>Stipa capensis</i> Thunb.	St.ca	-	-
Primulaceae	<i>Anagallis arvensis</i> L.	An.ar	-	LC
	<i>Lysimachia linum-stellatum</i> L.	Ly.li	-	LC
Ranunculaceae	<i>Delphinium ambiguum</i> L.	De.am	-	-
	<i>Nigella hispanica</i> L.	Ni.hi	-	LC
Rhamnaceae	<i>Ziziphus lotus</i> (L.) Lam.	Zi.lo	-	LC
Sapotaceae	<i>Argania spinosa</i> (L.) Skeels	Ar.sp	Endémique du Maroc+Algérie	NT
Solanaceae	<i>Lycium intricatum</i> Boiss.	Ly.in	-	LC
	<i>Withania adpressa</i> Cors.	Wi.ad	Endémique Maroc+Algérie	NT
	<i>Withania frutescens</i> (L.) Pauquy	Wi.fr	-	LC
Xanthorrhoeaceae	<i>Asphodelus fistulosus</i> L.	As.fi	-	-
	<i>Asphodelus microcarpus</i> Salzm. & Viv.	As.mi	-	-
	<i>Asphodelus tenuifolius</i> Cav.	As.te	-	-
Zygophyllaceae	<i>Fagonia cretica</i> L.	Fa.cr	-	LC

Statut de rareté sur la base des catégories de l'UICN (Selon Fennane, 2018)

NA : Non applicable (taxon non soumis à évaluation car : présence douteuse, statut taxonomique douteux, indigénat douteux, Adventice occasionnel, "taxon erratique" (cf UICN 2012b: 7, 8), en limite d'aire

LC : Taxon commun ; préoccupation mineure (risque de disparition faible)

DD : Données insuffisantes

NT : Taxon quasi menacé (proche du seuil des catégories menacées ou qui pourrait être menacé si des mesures de conservation spécifiques n'étaient pas prises)

VU/VU(e) : Taxon vulnérable

EN/EN(e) : Taxon en danger

Annexe 3. Les marqueurs spécifiques des provinces-régions étudiées

Province/région	Composition floristique	Marqueurs spécifiques	Concentration
Safi	<i>Chamaerops humilis</i> , <i>Withania frutescens</i> , <i>Ballota hirsuta</i> , <i>Retama monosperma</i> , et <i>Chamaecytisus albidus</i>	Acide oléique (C18:1)	44 et 45%
		Acide linoléique (18:2)	>35%
		δ-tocophérol	>88 mg/kg
		δ ¹³ C‰	-29 et -28‰
Essaouira	<i>d'Asparagus albus</i> , <i>Lavandula multifida</i> , <i>Ephedra altissima</i> , <i>Lycium intricatum</i> et <i>Thymus broussonetii</i>	Acides stéarique (C18:0)	3 à 5%
		Acide linoléique (C18:2)	32 à 33%
		γ-tocophérols	800 et 900mg/kg
Ida Outanane	<i>Periploca angustifolia</i> , <i>Tetraclinis articulata</i> , <i>Olea europaea</i> subsp. <i>maroccana</i> , et <i>Globularia alypum</i>	Acide oléique (C18:1)	48 à 49%
		Acide linoléique (C18:2)	31 à 32%
		δ-tocophérol	66 et 77 mg/kg
Taroudant	<i>Acacia gummiifera</i> , <i>Salvia aegyptiaca</i> , <i>Ziziphus lotus</i> , et <i>Pistacia atlantica</i>	acide palmitique (C16:0)	>16%
		α-Tocophérol	82 à 92 mg/kg
Tiznit	<i>Launaea arborescens</i> , <i>Thymus maroccanus</i> et <i>Haloxylon scoparium</i> .	γ-tocopherol	700 à 800 mg/kg
		δ-tocopherol	55 à 66 mg/kg
Sidi Ifni	<i>Kleinia anteuphorbium</i> , <i>Euphorbia officinarum</i> subsp. <i>echinus</i> et <i>Euphorbia regis-jubae</i> .	Acide oléique (C18:1)	47 à 48% et
		Acide linoléique (C18:2)	de 33 à 34%
		γ-tocophérol	900 et 1000 mg/kg
		δ ¹³ C‰	-31 à -29‰