

Dédicace

*J*e dédie ce travail à mes chers parents,
Á tous ceux et toutes celles qui m'ont accompagné et soutenu,
Á tous ceux qui me sont cher(es).

Remerciements

Ces fameux « remerciements »... On y pense avant même d'avoir débuté la rédaction de thèse. On se promet de n'oublier personne. Puis, arrivé le moment opportun, on bloque, on hésite, et on regarde « comment les autres ont rédigé les leurs », au risque de ne pas faire très original. Cependant, le travail de thèse étant de plus en plus « normé », laissant peu de place à la « patte de l'auteur », je n'ai pu me résigner à rédiger mes remerciements d'une manière trop convenue et académique. Avant toute chose, je tenais à remercier mes parents **Zahra OUSSI** et **Ali HSSAINI**. Que mes encadrants m'excusent de ne pas les citer en premier, mais cette thèse n'aurait pas vu le jour sans eux. Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.

Je tiens ensuite à exprimer mes plus chers et vifs remerciements à ma directrice de thèse, **Pr. Hafida HANINE**, pour la confiance qu'elle m'a témoigné en acceptant la direction scientifique de mes travaux. Je lui suis reconnaissant de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail, de sa grande compétence, de sa rigueur intellectuelle, de son dynamisme, et de son efficacité certaine que je n'oublierai jamais. Soyez assurée de mon attachement et de ma profonde gratitude.

Je tiens à remercier également **Dr. Jamal CHARAFI**, pour la confiance qu'il m'a accordée, pour toute l'autonomie dont j'ai pu bénéficier et pour ses encouragements au cours de la phase de rédaction. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie, car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse.

Mes remerciements vont également à mes encadrants **Dr. Rachid RAZOUK** et **Pr. Said ENNAHLI**. Vos remarques, et votre « prise de hauteur » sur mes travaux m'ont permis d'appréhender d'une nouvelle manière mes hypothèses de recherche, et mes premiers résultats empiriques. Nos discussions plus informelles, au long de l'exploitation des résultats m'ont permis de mener à bien mes recherches. Votre passion pour la recherche, vos esprits innovateurs et votre dynamisme perpétuel sont exemplaires.

Je suis fier d'avoir été formé par vous quatre. Vos qualités humaines, votre sérieux et votre rigueur m'impressionneront toujours.

J'adresse parallèlement mes remerciements au **Pr. Mustapha RAKIB**, pour avoir accepté de présider mon jury de soutenance de thèse.

Je remercie particulièrement les **Pr. Driss ELOTHMANI**, **Abdelmajid HADDIOU** et **Pr Hanaa HACHIMI** qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de ce travail et de toute l'attention qu'ils ont portée à sa lecture.

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance au **Pr. Marie-Laure FAUCONNIER**, directrice du service de chimie générale et organique, pour l'aide précieuse et les discussions scientifiques au démarrage de cette thèse, qui ont contribué

à l'avancée de mes travaux et de ma réflexion. J'avais une forte ambition d'apprendre directement de vous, en préparant ma thèse dans votre laboratoire, dans un projet de cotutelle ; malheureusement des considérations me dépassant se sont opposées.

Je remercie **Pr. Ali IDLIMAM** et **M^{lle} Rachida OUAABOU** de m'avoir accueilli au niveau du laboratoire "Energie solaire et Plantes Médicinale" à l'École Normale Supérieure (ENS) de Marrakech et de m'avoir aidé dans l'étude des isothermes et de la cinétique de séchage. De même, j'exprime ma reconnaissance aux **Pr. Francisca HERNANDEZ** de l'Université Miguel Hernández et **Pr. Manuel VIUDA-MARTOS** de l'École Polytechnique d'Orihuela en Espagne pour l'aide précieuse qu'ils m'ont accordé en acceptant d'analyser mes échantillons au niveau de leurs laboratoires.

Mes sincères remerciements, ma reconnaissance et ma grande estime sont à l'honneur de mes chers collègues et amis, **M. Abderraham MEKAOUI** et **M. Mohamed EL FECHTALI**, pour leur accompagnement, et leur collaboration précieuse depuis les premiers pas jusqu'à la fin de mon travail. Ce n'est pas facile de synthétiser tout ce que vous m'avez apporté, tout ce que nous avons partagé ensemble. Á mon cher ami et grand frère **M. El FECHTALI**, depuis que tu m'avais accueilli pour faciliter mon intégration, ton génie m'a imprégné. Dès lors, je t'ai côtoyé de tout près espérant me vêtir de tes vertus. Armé de ta fameuse expression "celui qui ne risque rien, ne gagne rien", je me suis totalement investi dans mon plan de formation qu'on a ensemble dessiné. Tes travaux en témoignent. Mille mercis cher **Mohamed**, tu as répondu à tous mes appels, au bureau ou ailleurs aux cafés. Á toi, je resterai redevable à jamais.

Un grand merci également à tous les membres des équipes de travail, avec qui j'ai partagé des moments forts ; des moments de sérieux, d'humour, de joie et aussi de stress. Je les remercie tous pour leur dynamisme, leur esprit d'équipe et la bonne atmosphère de travail qui a régné aux champs et aux laboratoires.

Je tiens à remercier, également, les responsables, techniciens et agents de la station expérimentale de « Ain Taoujdate ».

Il serait pour moi très risqué d'énumérer les personnes envers lesquelles je souhaite exprimer ma profonde gratitude, tant elles sont nombreuses et tant le risque d'oubli malencontreux est grand. Enfin, je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous !!!

Résumé

La présente thèse vise la valorisation de la figue (*Ficus carica*) par l'évaluation de ses attributs morfo-agronomiques et physico-biochimiques des différentes parties du fruit, combinée aux méthodes chimiométriques, sur une collection ex-situ de 135 génotypes dont 96 clones locaux et 44 variétés importées, criblée à l'aide de 52 descripteurs. Les résultats ont montré une large variabilité entre toutes les accessions, sur la base de l'ensemble des traits à l'exception du diamètre de l'ostiole, la couleur des lenticelles et la taille des graines. La corrélation canonique a révélé que la diversité phénotypique est principalement exprimée par les traits géométriques du fruit, sa couleur et les caractéristiques de son épiderme, en plus des teneurs en sucres, en anthocyanes et en flavonoïdes. Les statistiques inférentielles ont permis de sélectionner 25 cultivars représentant la variabilité totale, et qui ont fait l'objet de la suite du ciblage. La spectroscopie ATR-FTIR et la HPLC-DAD ont été utilisées pour identifier les empreintes biochimiques des épidermes et des pulpes de la figue. Combinées aux méthodes chimiométriques, les deux techniques ont révélé plusieurs biomarqueurs dont, la catéchine, l'(-)-épicatéchine, l'acide chlorogénique, la cyanidine-3,5-diglucoside, la cyanidine-3-O-rutinoside, la quercétine et l'apigénine qui ont été les plus discriminants. Pour la première fois, les graines de la figue ont été évaluées pour leur teneur en huile, en acides gras, en composés phénoliques totaux et pour leur activité antioxydante. Les résultats ont montré un rendement en huile important (21,54 - 28,52 %) avec un degré d'insaturation élevé (~88%), où l'acide linoléique est prédominant, suivi par l'acide linoléique. L'efficacité de la désaturation et le pouvoir antioxydant ont été plus élevés. En outre, la cinétique de séchage solaire en couche mince des figues, par modélisation des isothermes de sorption de l'humidité, à différentes températures et des chaleurs isostériques a été étudiée. Le plan expérimental de séchage par convection a combiné trois températures (60, 70 et 80 °C) et deux vitesses (150 et 300 m³/h), alors que les propriétés thermodynamiques ont été étudiées à 30, 40 et 50 °C dans six solutions salines saturées (KOH, MgCl₂, K₂CO₃, NaNO₃, KCl et BaCl₂). Les isothermes de sorption d'humidité chez les variétés "Sarilop" et "Kadota" ont été déterminés par une technique gravimétrique statique standard. Les isothermes de sorption d'eau de la figue appartiennent au type II avec une boucle d'hystérésis H3, se produisent par des mécanismes enthalpiques, et pour lesquels les modèles d'Enderby et de Peleg ont montré une prédiction de haute précision. Ces variétés ont également été soumises à un séchage solaire en couche mince. La température de 80 °C, combinée à un débit d'air de 300m³/h, au cours de 200 min étaient les valeurs optimales de séchage. Le modèle modifié de Handerson et Pabis présentait la meilleure prédiction du séchage des tranches de figues.

Mots-clés : *Ficus carica* L., évaluation morfo-agronomique, criblage biochimique, composés phénoliques, acides gras, isothermes, modélisation du séchage

Abstract

The present thesis is aiming at the valorization of figs by assessing the morpho-agronomic and physico-biochemical attributes of different fruit parts combined with chemometric methods. Indeed, ex-situ collection of 135 genotypes of which 96 were local clones and 44 were imported varieties were screened using 52 descriptors. Results showed a highly significant variability among all accessions, except for the drop at the ostiole, the lenticels color and the seeds size. Based on canonical correlation, the high level of phenotypic diversity among the genotypes is mainly expressed by the fruit geometrical traits, color and peel characteristics, besides sugars, anthocyanins and flavonoids amounts. Chemometrics methods narrowed the number of cultivars to 25, which captured a high level a total variance and underwent further analysis. ATR-FTIR spectroscopy and HPLC-DAD were used to identify the biochemical fingerprints of both fig peels and pulps. Combined to inferential methods, both techniques revealed several biomarkers, of which peel phenolic compounds were the most discriminant, particularly catechin, (-)-epicatechin, chlorogenic acid, cyanidin-3,5-diglucoside, cyanidine-3-O-rutinoside, quercetin and apigenin. Seeds were assessed for their oil content, fatty acids, total phenolics and invitro antioxidant activities for the first time. Results showed an important oil yield (21.54 - 28.52%) with a high degree of unsaturation (~88%), where linolenic acid was the predominant, followed by linoleic acid. The efficiency of the desaturation was higher among all seed oil samples, that shown a high antioxidant potency. In addition, the thin layer solar drying kinetics of figs by modeling of moisture sorption isotherms at different temperatures and isosteric heats were studied. The drying experimental design combined three air drying temperatures (60, 70 and 80 °C) and two drying velocities (150 and 300 m³/h), while the thermodynamic proprieties were studied at 30, 40 and 50 °C in six saturated salt solutions (KOH, MgCl₂, K₂CO₃, NaNO₃, KCl and BaCl₂). Moisture sorption isotherms of fig fruits ("Sarilop" and "Kadota") were determined by a standard static gravimetric technique. The fig water sorption isotherms belong to type II with H3 hysteresis loop and occurs by enthalpy-controlled mechanisms. Enderby and Peleg models showed high-accuracy prediction of the desorption isotherms for "Sarilop" and "Kadota". These varieties were also subjected to a thin layer solar drying. The drying temperature of 80 °C and air flow rate of 300m³/h were the optimum values for figs drying in a minimum time of 200 min. Modified Handerson and Pabis model presented the best prediction of fig slices drying.

Keywords: *Ficus carica* L., morpho-agronomic assessment, biochemical screening, phenolic compounds, fatty acids, isotherms, drying modeling

ملخص

تعد شجرة التين (*Ficus carica* L.) واحدة من بين أكبر الأنواع بين مجموعة كاسيات البذور حيث تضم حوالي 800 نوع موزعة في المناطق المدارية وشبه المدارية. والتي يحتضن تنوعاً وراثياً كبيراً، خصوصاً في النظم الإيكولوجية الزراعية التقليدية. خلال العشرية الأخيرة، استعادت زراعة التين أهميتها بسبب دورها الاقتصادي والبيئي والغذائي رغم أنها مازالت ضعيفة التثمين. العديد من العوائق تحد من تطور السلسلة، كالاتتماد على موارد نباتية غير متجانسة، ونقص المعطيات حول الخصائص الفيزيائية الكيميائية، وضعف التثمين ونقص الخبرة في تقنيات التحويل. هذه العوائق الرئيسية تؤدي إلى الانخفاض في الإنتاج وفي قدرة جودة الفاكهة على المنافسة، وبالتالي الحد من التسويق على نطاق واسع. تهدف هذه الأطروحة إلى تثمين التين من خلال تقييم خصائصه المورفولوجية والفيزيائية-الكيميائية والبيوكيميائية لمختلف أجزاء الفاكهة. الدراسة تمت على مجموعة مكونة من 135 من الأنماط الوراثية منقسمة إلى 96 نمط محلي و44 صنف أجنبي وذلك باستخدام 49 من الواصفات. بالإضافة إلى ذلك، تمت دراسة حركية التجفيف الشمسي على شرائح رقيقة من التين عن طريق نمذجة متساوي الحرارة لمتصلي الرطوبة على درجات حرارة وهواء مختلفة. جمع النموذج التجريبي للتجفيف الحراري ثلاث درجات حرارة (60 و70 و80 درجة مئوية) وسرعتين (150 و300 م / ساعة)، بينما تمت دراسة الخواص الديناميكية الحرارية عند 30 و40 و50 درجة مئوية في ستة محاليل ملحية مشبعة (CO_2K و MgCl_2 و KOH و NaNO_3 و KCl و BaCl_2). أظهرت النتائج تبايناً كبيراً بين جميع الأنماط، على أساس كل الصفات باستثناء قطر الفويهة ولون العديسات وحجم البذور. أظهر الارتباط الكنتوني أن التنوع الظاهري يعبر عنه بشكل أساسي من خلال السمات الهندسية للفاكهة ولونها وخصائص البشرة، بالإضافة إلى المحتويات من السكريات والأنثوسيانين والفلافونويدات. مكنت الإحصاءات الاستنتاجية من اختيار 25 صنفاً ممثلاً للتنوع الكلي لإجراء مزيد من الدراسة المعمقة. تم استخدام التحليل الطيفي -ATR FTIR و HPLC-DAD لتحديد السمات البيوكيميائية لجلد ولب التين. بالإشتراك مع الأساليب الكيميائية، أظهرت هاتان الطريقتان عن العديد من المؤشرات الحيوية مثل الكاتشين، (-)-إبيكاتشين، حمض الكلوروجينيك، السياندين-3،5-ديكلوكوسيد، السياندين-3-0-روتينوسايد، كيرسيتين و إبيجينين التي كانت الأكثر تميزاً. لأول مرة، تمت دراسة بذور التين من خلال فحص محتواها من الزيت والأحماض الدهنية والمركبات الفينولية الكلية ونشاطها المضاد للأكسدة. أظهرت النتائج إنتاجية كبيرة من الزيت (21.54 - 28.52٪) مع درجة عالية من عدم التشبع، حيث يكون حمض اللينوليك هو السائد، يليه حمض اللينوليك. فعالية التشبع وقوة مضادات الأكسدة كانت الأعلى. متساوي درجة الحرارة للرطوبة عند الأصناف "صغيلوب" و "كدوتا" تم تحديدها بواسطة تقنية قياس الثقل النوعي. ينتمي متساوي درجة امتصاص الماء للتين إلى النوع الثاني مع حلقة تباطؤ H3 ويحدث بواسطة آليات الانتالبي، والتي أظهرت لهم النماذج Enderby و Peleg توقعاً عالي الدقة. خضعت هذه الأصناف أيضاً إلى التجفيف الشمسي على شرائح رقيقة. دمج درجة الحرارة 80 مئوية مع كتلة هواء 300م³ في الساعة لمدة 200 دقيقة تعتبر ظروف التجفيف الأفضل. أظهر النموذج المعدل ل Handerson and Pabis أفضل تنبؤ لتجفيف شرائح التين. دراسات إضافية حول آليات تثبيط الأكسدة (الاسمرار) والتغيرات في المركبات البيوكيميائية والجوانب الميكروبيولوجية بعد التجفيف وخلال التخزين ضرورية لتسليط الضوء بشكل معمق على استقرار جودة التين المجفف.

كلمات مفتاحية: *Ficus carica* L.، التين، التوصيف المورفولوجي-زراعي، الفحص البيوكيميائي، مركبات الفينول،

الأحماض الدهنية، متساوي درجة الحرارة، نمذجة التجفيف.

Avant-propos

Cette thèse est soumise en vue de l'obtention du grade de Doctorat de l'Université Sultan Moulay Slimane, Facultés des Sciences et Techniques (FST) de Beni-Mellal. Ces travaux ont été réalisés au sein de l'Institut National de la Recherche Agronomique, Centre Régional de Meknès, à la FST de Beni-Mellal et à l'École Nationale d'Agriculture de Meknès, sous la supervision du Pr. Hafida HANINE, Dr. Jamal CHARAFI, Dr. Rachid RAZOUK et Pr. Said ENNAHLI. Ce travail de thèse a été financé par le projet « Optimisation de la valorisation du figuier par le biais du choix variétal et l'amélioration des procédés de séchage et de transformation » retenu dans le cadre du « Mécanisme Compétitif de Recherche Développement et Vulgarisation » (MCRDV 2017).

Ce travail est fédéré aussi par 3 autres laboratoires de compétences complémentaires :

- Laboratoire de l'Énergie Solaire et Plantes Aromatiques et Médicinales (LESPAM), École Nationale Supérieure Marrakech ;
- Département des sciences végétales et de la microbiologie, Groupe de recherche "Production et technologie végétales", Escuela Politécnica Superior de Orihuela, Alicante, Espagne ;
- Département de la technologie agroalimentaire, IPOA. École polytechnique supérieure d'Orihuela (Université Miguel Hernández), Ctra Beniel, Orihuela (Alicante), Espagne.

Et a fait objet de plusieurs publications scientifiques, et participations à des manifestations scientifiques nationales et internationales.

Publications scientifiques

Publiés

Hssaini, L., Hanine, H., Razouk, R., Ennahli, S., Mekaoui, A., & Charafi, J. (2019). Characterization of local fig clones (*Ficus carica* L.) collected in Northern Morocco. *FRUITS*, 74(2), 55-64.

Hssaini, L., Hanine, H., Razouk, R., Ennahli, S., Mekaoui, A., Ejjilani, A., & Charafi, J. (2019). Assessment of genetic diversity in Moroccan fig (*Ficus carica* L.) collection by combining morphological and physicochemical descriptors. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 1-18.

Hssaini, L., Charafi, J., Hanine, H., Ennahli, S., Mekaoui, A., Mamouni, A., & Razouk, R. (2019). Comparative analysis and physio-biochemical screening of an ex-situ fig (*Ficus carica* L.) collection. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 60(5), 671-683.

Hssaini, L., Hanine, H., Razouk, R., Ennahli, S., Mekaoui, A., Guirrou, I., & Charafi, J. (2020). Diversity Screening of Fig (*Ficus carica* L.) Germplasm through Integration of Morpho-agronomic and Biochemical Traits. International Journal of Fruit Science, 1-20.

Hssaini, L., Charafi, J., Razouk, R., Hernández, F., Fauconnier, M. L., Ennahli, S., & Hanine, H. (2020). Assessment of Morphological Traits and Fruit Metabolites in Eleven Fig Varieties (*Ficus carica* L.). International Journal of Fruit Science, 1-21.

Hssaini L., Hanine H, Charafi J, Razouk R, Elantari A, Ennahli S, Hernández F, Ouaabou R. 2020. First report on fatty acids composition, total phenolics and antioxidant activity in seeds oil of four fig cultivars (*Ficus carica* L.) grown inMorocco. OCL, [https:// doi.org/10.1051/ocl/2020003](https://doi.org/10.1051/ocl/2020003)

En soumission

Hssaini Lahcen*, Hanine Hafida, Ennahli Said, Charafi Jamal, Razouk Rachid, & Francisca Hernández. Comparative analysis of Sugars, organic acids, antioxidant capacity and phenolic content in 11 cultivars of dark and light-colored fig fruit (*Ficus carica* L.) (2020).

Lahcen Hssaini; Hafida Hanine; Rachid Razouk; Said Ennahli; Abderrahman Mekaoui; Mohamed El Fechtali; Jamal Charafi. Use of Biochemical and Morphological Markers as a Complementary Approach in Fig (*Ficus carica* L.) Assessment and Solving Mislabeling cases. (2020).

Lahcen Hssaini, Hafida Hanine, Jamal Charafi, Rachid Lahlali, Rachida Ouaabou, Rachid Razouk1, Said Ennahli*. Application of ATR-FTIR spectroscopy combined to chemometric method for rapid discrimination of fig (*Ficus carica* L.) cultivars. (2020).

Lahcen Hssaini, Rachida Ouaabou, Said Ennahli, Hafida Hanine, Razouk Rachid, Jamal Charafi, Ali Idlimam, Francisca Hernandez & Manuel Viuda-Martos. Moisture sorption isotherms and kinetics modeling of two fig (*Ficus carica* L.) varieties at different temperatures and isosteric heats. (2020).

Lahcen Hssaini, Rachida Ouaabou, Said Ennahli, Hafida Hanine, Razouk Rachid, Jamal Charafi, Ali Idlimam, Francisca Hernandez & Manuel Viuda-Martos. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of two fig (*Ficus carica* L.) varieties: “Kadota” and “Sarilop”. (2020).

Communications Orales

Lahcen Hssaini, Hafida Haninie, Jamal Charafi, Rachid razouk, Said Ennahli, Abderrahman Mekaoui, Primary and secondary metabolites screening in fig (*Ficus carica L.*) collection. SIAM, 15th Edition 2019 of the International Exhibition of Agriculture, Meknes, Morocco. (2019).

Lahcen Hssaini, Hafida Haninie, Jamal Charafi, Rachid razouk, Said Ennahli, Abderrahman Mekaoui, Variability of Phytochemical and antioxidant properties among fig genotypes (*Ficus carica L.*) In Morocco. Colloque International sur la Recherche en Agroalimentaire Sous le thème : Innovations et nouvelles tendances Faculté polydisciplinaire de Larache, 05-06 Février 2019

Lahcen Hssaini, Hafida HANINIE, Rachid RAZOUK, Said ENNAHLI, Abderrahman MEKAOUI, Jamal CHARAFI*. Skin color and biochemical proprieties of some local clones and foreign varieties of fig (*Ficus carica L.*) in morocco, International Agricultural, Biological & Life Science Conference, Edirne, Turkey. (2018).

Lahcen Hssaini, Hafida Haninie, Rachid Razouk, Said Ennahli, Ibtissam Guirrou, Abderrahman Mekaoui, Jamal Charafi*. Antioxidant compounds distribution and radical scavenging capacity in skin, pulp and fruit extracts of fig cultivars (*Ficus carica l.*), Fourth International American Moroccan Agricultural Sciences Conference - AMAS Conference IV, May 9-11, 2018, Meknes, Morocco (2018).

Lahcen Hssaini, Hafida Haninie, Rachid Razouk, Said Ennahli, Abderrahman Mekaoui, Jamal Charafi*. Multivariate Screening of Locals and Foreign Figs (*Ficus carica L.*) in Northern Morocco. Fourth International American Moroccan Agricultural Sciences Conference - AMAS Conference IV, May 9-11, 2018, Meknes, Morocco (2018).

Lahcen Hssaini, Hafida Haninie, Jamal Charafi, Rachid Razouk, Said Ennahli, Abderrahman Mekaoui. Genetic potential of the fig tree in Morocco and opportunities for valorization. Open Farm Day in National institute for Agricultural Reasearch, experimental stration of Aïn Taoujdate-Meknes. (2019).

Lahcen Hssaini, Hafida Haninie, Jamal Charafi, Rachid Razouk, Said Ennahli, Abderrahman Mekaoui. Screening multivarié des potentialités agromorphologiques et biochimiques du figuier (*Ficus carica L.*) au Maroc et étude de sa valorisation industrielle et son effet sur la qualité : Etude au service de la conservation et de la valorisation de l'espèce. Séminaire interne à l'Institut National de la Recherche Agronomique, centre régional de Meknès. (2018).

Communications affichées

Lahcen Hssaini, Hafida Haninie, Rachid RAZOUK, Abderrahman MEKAOUI, Jamal CHARAFI*. Agro-morphological diversity and biochemical characterization of local clones and foreign varieties of almond (*Prunus dulcis L.*) most cultivated in Morocco (2017).

Lahcen Hssaini, Hafida Haninie, Rachid Razouk, Abderrahman Mekaoui, Jamal Charafi*. Assessment of the varietal profile and quality of commercialized dried figs in the northern Morocco -preliminary results. Fourth International American Moroccan Agricultural Sciences Conference - Fourth International American Moroccan Agricultural Sciences Conference - AMAS Conference IV, May 9-11, 2018, Meknes, Morocco (2018).

Rajae Kettani*, Abdelghani Nabloussi, **Lahcen Hssaini**, and Chems Doha Khalfi. Evaluation of some new introduced hybrids of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under drought conditions in Morocco. Fourth International American Moroccan Agricultural Sciences Conference - AMAS Conference IV, May 9-11, 2018, Meknes, Morocco (2018).

Lahcen Hssaini, Hafida haninie, Rachid razouk, Abderrahman Mekaoui, Jamal Charafi*. Pomological and morphological variation of unknown fig (*Ficus carica* L.) genotypes belonging in INRA collection. Fourth International American Moroccan Agricultural Sciences Conference - AMAS Conference IV, May 9-11, 2018, Meknes, Morocco (2018).

Oumkeltoum Krimi Bencheqroun*, A. Hadiddou, M. Alghoum, A. Mekkaoui, and **L. Hssaini**. live Growing for Mitigation of Climatic Changes Effects. Fourth International American Moroccan Agricultural Sciences Conference - AMAS Conference IV, May 9-11, 2018, Meknes, Morocco (2018).

Assia Ejjilani*, Hafida Haninie, Rachid Razouk, **Lahcen Hssaini**, Abderrahman Mekaoui, Hakim Outghouliast, and Jamal Charafi. Physicochemical characterization of the pomegranate (*Punica granatum*) in INRA collection: a first step of selection of performants cultivars. Fourth International American Moroccan Agricultural Sciences Conference - AMAS Conference IV, May 9-11, 2018, Meknes, Morocco (2018).

Lahcen Hssaini, Hafida HANINIE, Rachid RAZOUK, Abderrahman MEKAOUI, Jamal CHARAFI*, (2018), Screening multivarié des potentialités pomologiques et technologiques du figuier (*Ficus carica* L.) au Maroc et optimisation des procédés de valorisation industrielle, Agrinova Startup competition, Qualipole meknes (2018).

Lahcen Hssaini, Hafida haninie, Rachid razouk, Abderrahman mekaoui, Jamal Charafi*. Survey and Multivariate Characterization of Some Figs Genotypes (*Ficus carica* L.) Prospected in Northern Morocco. Fourth International American Moroccan Agricultural Sciences Conference - AMAS Conference IV, May 9-11, 2018, Meknes, Morocco (2018).

Abréviations & symboles

TSS	: Solides solubles totaux (Total soluble solids)
°Brix	: Degré brix (indique sur la matière sèche soluble)
AT	: Acidité titrable
L*	: Clarté de la couleur
a*	: Variation de la couleur du rouge au vert
b*	: Variation de la couleur jaune au bleu
c*	: Intensité de la couleur
h°	: Angle de teinte (Hue°)
CIE	: Commission internationale de l'éclairage
MS	: Matière sèche
pH	: Potentiel hydrique
r	: Coefficient de corrélation
R ²	: Coefficient de détermination
ANOVA	: Analyse de la variance
DMRT	: Duncan's new multiple range test
ACP	: Analyse en composantes principales
PC	: Composante principale
mM	: Millimolaire
GAE	: Equivalent d'acide gallique
nm	: Nanomètre
m, cm, mm	: Mètre, centimètre, millimètre
Kg, g, mg	: Kilogramme, gramme, milligramme
CAM	: Coefficient d'absorption molaire
FD	: Facteur de dilution
Abs	: Absorbance
PAT	: Proanthocyanidines totales
A	: Indique l'absorbance de l'extrait
MW	: Poids moléculaire
AA	: Activité antioxydante
PPT	: Polyphénols totaux
FT	: Flavonoïdes totaux
ABTS	: Acide 3-éthyl-benzothiazoline-6-sulfonique
DPPH	: Phényl-1-picrylhydrazyl
IC50	: Concentration maximale à 50% d'inhibition
β-Car	: β-Carotène
ACC	: Analyse de corrélation canonique
sf ²	: Structure factorielle au carré
h ²	: Coefficient de communalité
λ	: Lambda
FTIR	: Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
ATR	: Réflectance totale atténuée
IR	: Infrarouge
HPLC-DAD	: Chromatographie liquide à haute performance à détecteur à barrettes de diodes
b.s.	: Base sèche
X _m	: Teneur en humidité monocouche (kg b.s. ⁻¹)
T	: Température

a_w	: Activité de l'eau
MR_{exp}	: Taux d'humidité d'équilibre expérimental
CCS	: Courbe caractéristique de séchage
D_v	: Débit volumique de séchage
t	: Temps de séchage (min)
f	: Taux de séchage sans dimension
Q_{st}	: chaleur isostérique de sorption (kJ/mol/K)
M	: Teneur en humidité
A, B, C & D	: Coefficients des modèles
a, b, c, k, n, k0, k1	: Paramètres des modèles
χ^2	: Khi-deux
R	: Constante des gaz parfait (8.314 J/mol K)
T	: Température absolue (K)
θ	: Température (°C)
df	: Degré de liberté de la régression du modèle
ΔE	: Différence totale en couleur
GLM	: Modèle général linéaire
SE	: Erreur standard
ODR	: Ratio de désaturation oléique
DR	: Ratio de désaturation linoléique
ω	: Oméga
MUFA	: Acides gras monoinsaturés
PUFA	: Acides gras polyinsaturés
TSFA	: Acides gras saturés totaux
TUFA	: Acides gras insaturés totaux

Liste des tableaux

Partie I. Etat de l'art et synthèse bibliographique

Tableau 1. Différences entre le caprifiguiier et le figuier femelle selon certains caractères et fonctions floraux (source Valdeyron et Lloyd, 1979 (adapté)).....	16
Tableau 2. Répartition régionale de la production des figues fraîches et séchées selon la Direction du Développement des Filières de Production (MAPMDREF, 2016)	20
Tableau 3. Composition de la figue fraîche en éléments nutritionnels (Moreiras <i>et al.</i> , 2013, Département Américain de l'agriculture et Service de Recherche (US. Department of Agriculture, Agricultural Research Service : USDA), 2016).....	23

Partie II. Design et Méthodologie Expérimentale

Tableau 4. Liste des clones locaux de figues et des variétés étrangères incluses dans l'étude.....	59
Tableau 5. Liste des descripteurs qualitatifs et quantitatifs de l'IPGRI et des coordonnées colorimétriques inclus dans l'analyse morphologique des échantillons de figues prélevés.	60
Tableau 6. Valeurs standards de l'activité de l'eau des sels utilisés en fonction de la température (Bizot <i>et al.</i> , 1978).....	70
Tableau 7. Modèles isothermes de sorption de l'humidité utilisés pour analyser les données des cultivars du figuier.....	75
Tableau 8. Modèles mathématiques appliqués aux courbes de séchage de figues	79

Partie III. Résultats et discussions

Chapitre I. Criblage morpho-agronomique et physico-biochimique d'une collection ex-situ de 135 cultivars de figuier (*Ficus carica* L.)

Tableau 9. Valeurs moyennes de quelques caractères morphologiques, colorimétriques et physicochimiques des accessions du figuier étudiées	91
Tableau 10. Fréquences dominantes et analyse de la variance des caractéristiques qualitatives des fruits	92
Tableau 11. Statistiques descriptives des propriétés pomologiques et colorimétriques des figues	93
Tableau 12. Matrice de de corrélations entre les caractères agro-morphologiques et physico-chimiques des génotypes de figues évalués. Seulement les corrélations importantes sont présentées	96
Tableau 13. Vecteurs propres des principaux axes de l'analyse en composantes principales ACP. Les valeurs supérieures à 0.45 sont marquées en gras.....	98
Tableau 14. Analyse de la variance des données du criblage biochimique de la collection du figuier	106
Tableau 15. Teneurs moyennes des propriétés biochimiques étudiés chez quelques cultivars de la collection	107
Tableau 16. Teneurs moyennes des propriétés biochimiques étudiés chez quelques cultivars de la collection (Suite).....	108
Tableau 17. Concentrations minimales inhibitrices (IC50) de certains cultivars de la collection	110
Tableau 18. Matrice des corrélations entre les composés biochimiques, l'activité antioxydante et les coordonnées chromatiques impliqués dans le criblage de la collection de figuier.	112
Tableau 19. Vecteurs propres des composantes principales de l'analyse PCA	113
Tableau 20. Analyse canonique des corrélations pour les traits morpho-agronomiques (ensemble 1) et les composants biochimiques (ensemble 2) les plus discriminants pour les fonctions 1 et 2	118

Tableau 21. Variables canoniques et statistiques connexes.....	119
Tableau 22. Caractéristiques des génotypes sélectionnés selon les descripteurs révélés discriminants par l'analyse canonique.....	122
Tableau 23. Caractéristiques des génotypes sélectionnés selon les descripteurs révélés discriminants par l'analyse canonique.....	123
Tableau 24. Principales empreintes biochimiques dans les spectres ATR-FTIR et composés biochimiques leurs sont attribués.....	125
Tableau 25. Aires des principales bandes d'absorption dans les spectres ATR-FTIR intégré pour les échantillons de pulpes. Les valeurs moyennes \pm les erreurs-types de la moyenne sont présentées.	128
Tableau 26. Aires des principales bandes d'absorption dans les spectres ATR-FTIR intégré pour les épidermes des figes. Les valeurs moyennes \pm les erreurs-types de la moyenne sont présentées.	130
Tableau 27. Cosinus carré des variables étudiées (bandes principales de vibrations) sur les deux premières composantes de l'ACP.	131
Tableau 28. Assignations, temps d'élution, aires des pics détectés au niveau de la pulpe de la figue ; Exemple de la variété " White Adriatic"	135
Tableau 29. Assignations, temps d'élution, aires des pics détectés au niveau de l'épiderme de la figue ; Exemple du clone local " INRA 1305".....	136
Tableau 30. Statistiques descriptives et analyse de la variance (ANOVA oneway) des composés phénoliques détectés au niveau des pulpes des échantillons de figes	137
Tableau 31. Teneurs en composés phénoliques détectés dans les pulpes des figes étudiées (moyenne \pm écart type). Les teneurs sont exprimées en $\mu\text{g/g}$ de la matière sèche..	138
Tableau 32. Statistiques descriptives et analyse de la variance (ANOVA oneway) des composés phénoliques détectés au niveau des épluches des échantillons de figes. Les teneurs sont exprimées en $\mu\text{g/g}$ de la matière sèche.....	140
Tableau 33. Teneurs en composés phénoliques détectés dans les épluches des figes étudiées (moyenne \pm écart type). Les teneurs sont exprimées en $\mu\text{g/g}$ de la matière sèche..	141
Tableau 34. Concentrations de quelques fruits étudiés dans la littérature en composés phénoliques	142
Tableau 35. Cosinus carré des composés phénoliques détectés dans les pulpes des figes sur les deux premières composantes de l'ACP.	143
Tableau 36. Cosinus carré des composés phénoliques détectés dans les épidermes des figes sur les trois premières composantes de l'ACP.....	144
Tableau 37. Teneurs en sucres individuels des figes entières en fonction des cultivars	147

Chapitre II. Valorisation post-récolte des figes : cinétique des isothermes, modélisation de séchage et étude biochimique de l'huile des graines

Tableau 38. Taux d'humidité d'équilibre d'adsorption et de désorption obtenus à différentes activités et températures de l'eau	151
Tableau 39. Paramètres estimés des modèles pour les variétés du figuier à différentes températures des courbes de désorption et d'adsorption.....	154
Tableau 40. Paramètres caractéristiques de la relation enthalpie-entropie.....	159
Tableau 41. Surface de l'eau (S_0) de deux variétés du figuier à différentes températures.....	160
Tableau 42. Caractéristiques physiques des tranches de figes séchées en fonction de la température, du débit d'air et de la température	167
Tableau 43. Résultats de l'analyse de la variance à l'aide de la procédure GLM	167
Tableau 44. Équations polynomiales des courbes caractéristiques du séchage pour les deux variétés du figuier	168
Tableau 45. Valeurs de diffusivité effective des tranches de figes pour les différentes conditions du séchage	170

Tableau 46. Energie d'activation et coefficient de corrélation correspondant aux différents niveaux des flux d'air du séchage	171
Tableau 47. Statistiques obtenues à partir de tous les modèles appliqués sur les données du séchage des deux variétés du figuier en fonction de la température et du débit d'air.	173
Tableau 48. Profils d'acides gras de l'huile des graines des figes étudiés déterminés par chromatographie en phase gazeuse liquide (% m/m)	180
Tableau 49. Variation dans les ratios liés à : désaturation des acides gras (ODR et LDR) et ω -6/ ω -3 entre cultivars du figuier	181
Tableau 50. Groupes fonctionnels et modes de vibration dans le spectre IR des huiles de graines des figes	184

Liste des figures

Partie I. Etat de l'art et synthèse bibliographique

Figure 1. Classification taxonomique du figuier (source : López-Corrales y col., 2011 (adapté))	11
Figure 2. Figuier (<i>Ficus carica</i> L.). Source : Domaine expérimental de Ain Taoujdate.....	13
Figure 3. Morphologie de la fleur du figuier (<i>Ficus carica</i> L.) (source : Armstrong, 2006 (modifiée))	15
Figure 4. Coupe longitudinale d'une figue (source : Oukabli <i>et al.</i> , 2008).....	17
Figure 5. Cartographie des productions de figes (moyenne entre 1994 et 2016) (source : FAOSTAT,2018)	19
Figure 6. Principaux pays producteurs de la figue au monde (source FAOSTAT, 2018)	19
Figure 7. Structures des polyphénols : A) flavonoïdes B) non flavonoïdes. Source : Khatib et Vaya, 2010 ; Moreno et Peinado, 2012.....	30
Figure 8. Structure des principales anthocyanidines présentes dans les fruits.	33
Figure 9. Classification des polyphénols antioxydants (Shahidi et Ambigaipalan, 2015).....	35
Figure 10. Structure chimique du β -carotène (carotène) (A) et de la lutéine (B) (Fernández-León <i>et al.</i> , 2010).	36
Figure 11. Structure chimique de la chlorophylle A et B (Fernández-León <i>et al.</i> , 2010).....	36
Figure 12. Mécanisme réactionnel intervenant lors du test DPPH entre le radical DPPH• et un antioxydant (R:H).....	38
Figure 13. Mécanisme réactionnel entre le radical ABTS•- et un antioxydant.	38
Figure 14. Mécanisme réactionnel intervenant lors du test FRAP entre le complexe tripyridy-s-tri-azine ferrique (Fe ³⁺)-TPTZ et un antioxydant (AH).	39
Figure 15. Réaction des radicaux β -carotène et peroxy lipidiques.....	40
Figure 16. Variabilité de forme, taille, couleur de pulpe et d'épiderme des figes d'automne de la collection de la station expérimentale d'Ain Taoujdate (2018) (INRA-Meknès).	43
Figure 17. Classification des séchoirs solaires (Fudholi <i>et al.</i> , 2010).	48
Figure 18. Schéma principal du procédé de séchage à la vapeur surchauffée (Tatemoto <i>et al.</i> , 2007).	50
Figure 19. Principales réactions de dégradations des aliments en fonction de l'aw, [Cheftel et Cheftel, 1977].....	52
Figure 20. Sections principales de l'isotherme de sorption de type II.	54
Figure 21. Types d'isothermes décrits par Brunauer (Mathlouthi & Rogé, 2003 (20)).....	55
Figure 22. Photos de figes fraîches en pleine maturité. A droite la variété "Col de Dame Blanche" et à gauche la variété "Sarilop"	57

Partie II. Design et Méthodologie Expérimentale

Figure 23. Carte montrant la localisation du domaine expérimental à Ain Taoujdate – Meknès marqué par un triangle rouge par rapport à la ville de Beni-mellal.	58
Figure 24. Courbe de régression linéaire de l'acide ascorbique et Trolox pour le test de blanchiment du β -carotène	65
Figure 25. Equipement expérimental pour la détermination des isothermes de sorption : (1) bain thermostaté ; (2) pot hermétique ; (3) porte-échantillon ; (4) échantillon ; (5) solution saline saturée.....	71
Figure 26. Schéma du séchoir solaire. (1) Capteur solaire, (2) ventilateur de circulation, (3) ventilateur, (4) direction du flux d'air, (5) boîte de contrôle, (6) système de chauffage	

auxiliaire, (7) étagères, (8) armoire de séchage, (9) recyclage d'air, (10) pied de contrôle, (11) sortie d'air, (12) sonde d'humidité et (13) thermocouple (14) porte échantillon (Ouaabou et al, 2018).....	76
Figure 27. Répartition des génotypes de figuier selon la couleur de fond de l'épiderme du fruit dans l'espace chromatique L*a*b* CIE	90

Partie III. Résultats et discussions

Chapitre I. Criblage morpho-agronomique et physico-biochimique d'une collection ex-situ de 135 cultivars de figuier (*Ficus carica* L.)

Figure 28. Classification hiérarchique ascendante des génotypes de figues comestibles étudiés à partir des caractères agro-morphologiques, colorimétriques et physico-chimiques par la méthode de la distance euclidienne	101
Figure 29. Diagramme de dispersion des deux premières composantes principales (PC1 et PC2, 22,29% de la variance totale) pour la collection de figues étudiée, basé sur tous les descripteurs.....	102
Figure 30. Dendrogramme des accessions du figuier sur la base de leurs propriétés biochimiques.	116
Figure 31. Classification hiérarchique ascendante des génotypes de figues étudiés à partir des attributs morpho-agronomiques et biochimiques à distance euclidienne. Les grappes discriminées ont été spécifiées par des nombres et des couleurs uniques.....	120
Figure 32. Répartition des génotypes sélectionnés dans le dendrogramme de croblage morpho-agronomique et biochimique de la collection du figuier. Les génotypés en question sont repérés par des bondes rouges	121
Figure 33. Spectres infrarouges (450 – 4000 cm ⁻¹) des épidermes (A) et de la pulpe (B) des fruits de vingt-cinq cultivars.....	126
Figure 34. Spectres ATR-FTIR des principales d'ondes de vibration des échantillons de pulpe. Chaque spectre représente la moyenne de 3 spectres, qui correspondent chacun à l'accumulation de 128 balayages.....	127
Figure 35. Spectres ATR-FTIR des principales d'ondes de vibration des épidermes. Chaque spectre représente la moyenne de 3 spectres, qui correspondent chacun à l'accumulation de 128 balayages.	129
Figure 36. Diagramme de dispersion d'échantillons de pulpes selon les empreintes biochimiques 3700-3000, 3000-2800, 1775-1725, 1700-1550, 1500-1300 et 1175-940 cm ⁻¹ des spectres ATR-FTIR.....	132
Figure 37. Diagramme de dispersion d'échantillons des épidermes selon les empreintes biochimiques 3700-3000, 3000-2800, 1775-1725, 1700-1550, 1500-1300 et 1175-940 cm ⁻¹ des spectres ATR-FTIR	132
Figure 38. Structures chimiques des principaux composés phénoliques détecté au niveau des pulpes des figues analysées.	134
Figure 39. Structures chimiques des principaux composés phénoliques détecté au niveau des épidermes des figues analysées.	134
Figure 40. Chromatographe montrant la séparation des phénols dans la pulpe de la figue ; Exemple de la variété " White Adriatic" par CLHP-DAD à 280, 320, 360 ou 520 nm. Pour l'attribution des pics, voir le tableau 24.	135

Figure 41. Chromatographe montrant la séparation des phénols dans l'épiderme de la figue ; Exemple du clone local" INRA 1305d" par CLHP-DAD à 280, 320, 360 ou 520 nm. Pour l'attribution des pics, voir le tableau 25. 136

Figure 42. Diagrammes de dispersion des deux premières composantes principales pour les échantillons des pulpes et épidermes des figues étudiées, basé sur les composés phénoliques détectés dans chacune des parties du fruit. 145

Figure 43. Diagramme de dispersion résultant de l'ACP basé sur l'analyse l'ATR-FTIR, montrant les groupes auxquels appartiennent les cultivars sélectionnés pour l'analyse des acides organiques et sucres par HPLC-DAD. 146

Figure 44. Teneur en acides organiques (g kg⁻¹) des figues entières. Les valeurs moyennes ± l'écart-type sont présentées ; les différences statistiquement significatives (p<0,05) entre les cultivars sont présentées sur les barres d'erreur (a-f). Des diagrammes en boîtes et en moustaches ont été utilisés pour montrer la distribution d'un ensemble de données. Citric A. =acide citrique et Malic A. = Acide malique. 148

Figure 45. Rapport sucres/acides organiques dans les 11 cultivars de figuier étudiés. Les valeurs moyennes ± l'écart-type sont présentées ; les différences statistiquement significatives entre les cultivars sont présentées sur les barres d'erreur (a-h). 149

Figure 46. Isothermes de désorption et d'adsorption des deux variétés du figuier à 30, 40 et 50 °C 152

Chapitre II. Valorisation post-récolte des figues : cinétique des isothermes, modélisation de séchage et étude biochimique de l'huile des graines

Figure 47. Propriétés hygroscopiques à 30, 40 et 50°C pour les deux variétés du figuier 153

Figure 48. Chaleur isostérique nette des isothermes pour les variétés du figuier étudiées en fonction de leurs teneurs en eau à l'équilibre 156

Figure 49. Détermination de l'activité de l'eau optimale dans des échantillons de figues en utilisant une troisième équation polynomiale 156

Figure 50. Entropie différentielle des isothermes pour les variétés du figuier en fonction de l'équilibre de l'humidité 157

Figure 51. Relation entropie-enthalpie pour la désorption et l'adsorption de l'eau chez les deux variétés du figuier 159

Figure 52. Humidité relative, température (A) et rayonnement solaire (B) sur le collecteur du sécheur pendant l'expérience de température de l'air de séchage de 60 °C 162

Figure 53. Temps de séchage en fonction de la température et du débit volumique de séchage. Dv : correspond au débit de l'air. 163

Figure 54. Courbes expérimentales de l'humidité des figues en fonction du temps, à différentes températures de l'air (60, 70 et 80°C) et différents débits volumiques de séchage (150 et 300 m³/h) 165

Figure 55. Images des figues fraîches entières et de leurs tranches séchées à 80 °C et 300 m³/h. a,b et c,d font référence respectivement à "Sarilop" et "Kadota". 166

Figure 56. Courbe caractéristique de séchage (a) et taux de séchage sans dimension en fonction du taux d'humidité des variétés Kadota et Sarilop (b) 168

Figure 57. Représentation graphique de Ln(Y*) en fonction du temps de séchage selon les différents débits de l'air pour les deux variétés du figuier 'Kadota' et 'Sarilop'. 169

Figure 58. Représentation graphique de $\ln(D_{\text{eff}})$ contre $1/T$ pour les deux variétés du figuier à différents débits d'air de séchage..... 171

Figure 59. Données expérimentales du taux d'humidité en fonction du temps de séchage avec le modèle modifié de Handerson et Pabis à $Dv=150 \text{ m}^3/\text{h}$ 172

Figure 60. Comparaison des taux d'humidité expérimentaux et prédits des deux variétés du figuier par le modèle modifié de Handerson et Pabis 172

Figure 61. Aspect des huiles extraites des graines des figues..... 176

Figure 62. Teneur en huile des graines des figues (%) étudiés (valeurs moyennes \pm écart-type). Les différences statistiquement significatives entre les cultivars sont présentées sous forme de barres d'erreur (a-c)..... 176

Figure 63. Chromatogramme des acides gras de l'huile des graines des figues. Exemple de la variété "White Adriatic" (C15:0 = acide pentadécylique, C16:0 = acide palmitique, C16 : ω 1 = acide palmitoléique, C17:0 = acide margarique, C17 :1 = acide heptadécénoïque, C18:0 = acide stéarique, C18:1 ω 9 = acide oléique, C18:0 = acide linoléique, C18:3 = acide g-linolénique, C20:0= acide arachidique, C20:1= acide gondoïque)..... 177

Figure 64. Teneurs en polyphénols totaux (mg GAE/100g d'huile), DPPH et ABTS (%) et de l'IC₅₀ (mg/mL) chez les cultivars du figuier (valeurs moyennes \pm écart type). Les différences statistiquement significatives entre les cultivars sont exprimées selon le test de post-hoc Duncan (a-c)..... 183

Figure 65. Spectres FTIR (450 – 4000 cm^{-1}) des huiles des graines de figues 184

Figure 66. Spectres IR individuels des pics les plus intense dans l'intervalle de longueur d'onde de 3050-1000 cm^{-1} 186

Liste des annexes

Annexe 1. . Constantes et statistiques des modèles évalués pour la variété Kadota à $Dv=150 \text{ cm}^3/\text{h}$ 232

Annexe 2. Constantes et statistiques des modèles évalués pour la variété Kadota à $Dv=300 \text{ cm}^3/\text{h}$ 232

Annexe 3. Constantes et statistiques des modèles évalués pour la variété Sarilop à $Dv=150 \text{ cm}^3/\text{h}$ 234

Annexe 4. Constantes et statistiques des modèles évalués pour la variété Sarilop à $Dv=300 \text{ cm}^3/\text{h}$ 235

Annexe 5. HPLC-DAD chromatogramme des acides organiques. Exemple de ma variété EL Quoti Lbied..... 236

Annexe 6. HPLC-DAD chromatogramme des acides organiques. Exemple de ma variété "Snowden"..... 236

Table des matières

Introduction générale	1
Contexte et problématique.....	1
Hypothèses directrices de la thèse	3
Objectifs de la thèse.....	4
Structure de la thèse	6

Partie I. État de l'art et synthèse bibliographique

Chapitre I. Généralités sur le figuier (<i>Ficus carica</i> L.)	10
I. Taxonomie.....	10
II. Origine géographique.....	12
III. Description botanique.....	13
1. Description végétative	13
2. Biologie florale.....	14
3. Types de production	17
IV. Importance de la culture de figuier	18
1. A l'échelle mondiale.....	18
2. A l'échelle nationale.....	19
V. Diversité phénotypique chez le figuier.....	21
Chapitre II. Valeurs nutritionnelles de la figue	23
I. Composition nutritionnelle.....	23
1. Glucides	24
2. Acides organiques	24
3. Fibres.....	25
4. Protéines.....	25
5. Matière grasse.....	26
6. Minéraux.....	26
7. Vitamines.....	27
8. Composés volatiles	27
9. Composants bioactifs.....	28
10. Composants bioactifs lipophiles	35
11. Activité de piégeage des radicaux libres et méthodes de détermination	37
II. Paramètres d'évaluation de la maturité des figues.....	40
1. Paramètres physico-chimiques	40
2. Paramètres sensoriels.....	41
III. Apport de l'approche FTIR spectroscopie Infra rouge	42
IV. Utilisation de la chimiométrie en analyse des aliments.....	43
Chapitre III. Procédés de conservation des figues par déshydratation	44
1. Séchage à l'air libre.....	44
2. Séchoir solaire	46
3. Quelques techniques modernes de séchage.....	48
4. Interaction eau-matière : étude thermodynamique	51

Partie II. Design et Méthodologie Expérimentale

Chapitre I. Criblage morpho-agronomique et physico-biochimique d'une collection ex-situ de 135 cultivars de figuier (<i>Ficus carica</i> L.)	57
I. Matériel végétal.....	57
II. Paramètres de caractérisation morpho-agronomique et physicochimique.....	58
III. Paramètre de caractérisation biochimique	61
1. Préparation des extraits	61

2. Polyphénols totaux (PT).....	61
3. Flavonoïdes totaux (FT).....	61
4. Anthocyanes totaux (AT).....	62
5. Sucres solubles totaux.....	62
6. Proanthocyanidines totales (PAT).....	62
7. Activité antioxydante (AA).....	63
IV. Combinaison des résultats de criblage morpho-agronomique, physicochimique et biochimique.....	65
1. Analyse par spectroscopie ATR-FTIR.....	66
2. Analyse des profils des polyphénols, des sucres et des acides organiques.....	67
V. Analyse statistique des données.....	69

Chapitre II. Valorisation post-récolte des figes : cinétique des isothermes, modélisation de séchage et étude biochimique de l'huile des graines..... 70

I. Cinétique et modélisation des isothermes de sorption.....	70
1. Procédure expérimentale.....	70
2. Analyse des données et modélisation.....	71
3. Détermination des conditions optimales de conservation.....	72
4. Analyses thermodynamiques.....	72
II. Modélisation du séchage solaire en couche mince.....	75
1. Expériences de séchage.....	75
2. Dispositif expérimental.....	76
2. Détermination des taux d'humidité et de séchage.....	77
3. Diffusivité effective de l'humidité.....	77
4. Ajustement des courbes de séchage.....	79
5. Détermination de la couleur et de l'activité de l'eau.....	79
6. Théorie de compensation enthalpie/entropie.....	80
III. Analyse biochimique de l'huile des graines de fige.....	81
1. Matériel végétal.....	81
3. Identification des acides gras par chromatographie gazeuse liquide.....	82
4. Extraction et dosage des polyphénols totaux.....	83
5. Activité antioxydante par le test DPPH et ABTS.....	83
6. Analyse dans le proche infrarouge (ATR-FTIR).....	84

Partie III. Résultats et discussions

Chapitre I. Criblage morpho-agronomique et physico-biochimique d'une collection ex-situ de 135 cultivars de figuier (*Ficus carica* L.)

Chapitre I. 1. Evaluation de la diversité génétique de la collection de figuier par les descripteurs morpho-agronomiques et physico-chimiques..... 86

1. Analyse descriptive.....	86
2. Corrélations entre les variables.....	93
3. Analyse en composantes principales (ACP).....	94
4. Analyse du dendrogramme et du diagramme de dispersion.....	99
5. Conclusion.....	103

Chapitre I. 2. Analyse et criblage des propriétés biochimiques des fruits entiers de la collection du figuier..... 104

1. Analyse descriptive.....	104
2. Concentration maximale inhibitrice de 50% des radicaux (IC50).....	109
3. Corrélations entre les propriétés biochimiques des figes.....	110
4. Analyse en composantes principales.....	113
5. Classification hiérarchique ascendante (CHA).....	114
6. Conclusion.....	115

Chapitre I. 3. Sélection raisonnée de cultivars prometteurs pour des analyses approfondies.....	117
1. Analyse canonique des corrélations.....	117
2. Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)	119
3. Sélection des génotypes représentatifs de la collection.....	121
4. Apport du criblage multivarié et enchainement vers la valorisation.....	124
Chapitre II. Valorisation post-récolte des figes : cinétique des isothermes, modélisation de séchage et étude biochimique de l'huile des graines	
I. Analyse des cultivars sélectionnés dans le proche infrarouge combinée à la chimiométrie	124
1. Analyse spectrale.....	124
2. ATR-FTIR des principaux pics et de leurs aires calculées	126
3. Analyse chimiométrique	130
II. Détermination des profils phénoliques par HPLC-DAD.....	133
1. Profils des composés phénoliques	133
2. Analyse en composantes principales (ACP).....	143
3. Diagramme de dispersion (scatter plot).....	144
III. Analyse des sucres et des acides organiques chez la fige	145
1. Profil des Sucres	146
2. Profil d'acides organiques	147
3. Rapport sucres/acides organiques.....	148
IV. Conclusion	149
Chapitre II. 1. Cinétique et modélisation des isothermes de sorption et propriétés thermodynamiques de deux variétés de figiers.....	150
1. Isothermes de sorption d'humidité	150
2. Ajustement des modèles de sorption aux données expérimentales	153
3. Propriétés thermodynamiques	155
4. Entropie différentielle de sorption	157
5. Théorie de compensation enthalpie/entropie.....	157
6. Surface de l'eau (S ₀).....	159
7. Conclusion.....	161
Chapitre II. 2. Modélisation mathématique du séchage solaire en couche mince.....	162
1. Courbes de séchage	163
2. Changement des caractéristiques physiques et de couleur.....	165
3. Courbe caractéristique du séchage.....	167
4. Diffusion effective de l'humidité.....	168
5. Energie d'activation	170
6. Modélisation des courbes de séchage.....	171
7. Conclusion.....	174
Chapitre II. 3. Huile de figes comme autres voies de valorisation lipochimique du figier : Composition en acides gras, teneur phénolique totale et activité antioxydante.....	175
1. Teneur en huile	175
2. Composition en acides gras de l'huile de graines	176
3. Ratios d'acides gras	178
4. Teneur en polyphénols totaux et activité antioxydante.....	181
5. Analyse spectrale des huiles de figes	183
6. Conclusion.....	186
Conclusion générale.....	188
Perspectives de recherche.....	192

Introduction générale

Contexte et problématique

La figue, fruit sacré anciennement connu dans le monde, cité dans le coran, la bible et l'hébreu, est probablement originaire de l'Asie centrale et domestiqué dans plusieurs régions, dont le pourtour du bassin méditerranéen plus particulièrement (Podgornik *et al.*, 2010). Cette espèce (*Ficus carica* L.), la seule cultivée du genre *Ficus*, a été cultivée par les Phéniciens, les Syriens, les Egyptiens et les Grecs dans toutes ces aires au point où l'on pense qu'elle est indigène. Le figuier a évolué à travers les âges d'une plante sauvage à un arbre cultivé très apprécié pour ses valeurs mythiques, religieuses, nutritives et pour sa résilience (Rodolfi *et al.*, 2018). La figue n'a pas été, toutefois, suffisamment mise en valeur, en dépit de toutes ses vertus médicinales et socio-économiques. Et au Maroc, il ne jouit malheureusement que d'une culture traditionnelle.

Dans la valorisation de la figue (*Ficus carica* L.) au Maroc, contrée riche en biodiversité de l'espèce, le champ est encore vierge. Troisième pays producteur, le figuier s'y trouve heurté à plusieurs contraintes qui freinent sa compétitivité sur le marché mondial (Hssaini *et al.*, 2019). Facilement périssable, la figue a toujours été marginalisée, en raison surtout du manque de savoir-faire, de la technologie appropriée à sa valorisation, et à la faible importance associée aux politiques agricoles antérieures (Hmimsa, 2012). Avec le lancement du Plan Maroc Vert, il regagne de l'ampleur grâce à l'extension des plantations, à la mise en place des unités de valorisation et à aux subventions accordées aux intervenants dans la chaîne de valeur du fruit. Toutefois, plusieurs questions importantes relatives aux aspects agronomiques, biochimiques et industriels sont à résoudre (MAPMDREF, 2016).

Au Maroc, outre le nombre limité de travaux sur la diversité génétique, d'autres aspects directeurs demeurent inexplorés. En effet, la variabilité phénotypique des figues, n'ayant porté que sur un nombre limité de cultivars, a été réalisée dans des agroécosystèmes différents (Ater *et al.*, 2005 ; Khadari *et al.*, 2005a ; Achtak *et al.*, 2009 ; Achtak *et al.*, 2010 ; Khadari *et al.*, 2010), et donc probablement fort influencée par l'environnement et la dissemblance des pratiques culturelles (Podgornik *et al.*, 2010). Par ailleurs, d'autres études ont mis en exergue le problème de confusion variétale qui entrave l'exploitation des ressources locales aux origines polyclonales (Khadari *et al.*,

2010). L'élaboration d'un référentiel national sur les potentialités agronomiques d'une large collection de figuier aux profils variétaux les plus cultivés, se voit d'une nécessité ultime pour la caractérisation et l'orientation des programmes d'amélioration et de sélection génétiques futurs. Les travaux disponibles ont principalement mis l'accent sur la variabilité du germoplasme local moyennant des descripteurs moléculaires et pomologiques (Khadari *et al.*, 2005b ; Achtak *et al.*, 2010 ; Oukabli *et al.*, 2008 ; Ait Haddou *et al.*, 2014), et rares sont ceux ayant inclus d'autres pistes de description tels les marqueurs physicochimiques et biochimiques couplés aux méthodes chimiométriques, pouvant contribuer à une discrimination meilleure.

Sur le plan biochimique, il n'existe pas d'études exhaustives sur les potentiels et attributs de la figue au Maroc, et ainsi la sélection et la valorisation industrielle demeurent encore indécises (Hssaini *et al.*, 2019). D'autres techniques de criblage peuvent répondre à cet objectif, en l'occurrence la chromatographie à haute pression en phase liquide et la spectroscopie dans le proche infrarouge. Les deux combinées, auront pour effet de rehausser la pertinence de discrimination et de classification du germoplasme, et ainsi permettre d'orienter au mieux sa valorisation industrielle.

L'extension de la durée de conservation des figues après récolte, demeure faiblement maîtrisée, même en présence d'une demande croissante tout au long de l'année des figues aux normes de qualité élevées (Desa *et al.*, 2019). Cependant, les fruits frais récoltés continuent à subir plusieurs changements qui entraînent leur détérioration, à cause des réactions biochimiques (enzymatiques et non enzymatiques), des troubles physiologiques ou une sensibilité aux agents pathogènes (Jung *et al.*, 2017). La prolongation de leur conservation réduit le gaspillage dû au stockage et amoindrit le coût du transport vers des marchés lointains (Desa *et al.*, 2019). Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes de conservation des aliments ont été pratiquées, notamment le séchage, peu étudié sur la figue, et les travaux entrepris se limitent à l'aptitude variétale et à l'impact sur certains aspects organoleptiques (Desa *et al.*, 2019). Toutefois, les isothermes d'équilibre, la cinétique et la thermodynamique des interactions lors de ce processus n'ont jamais été investigués. L'étude des phénomènes de transfert pendant le séchage et l'identification des facteurs internes et externes limitant ces échanges sont, en effet, d'une importance capitale pour la modélisation du processus (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002). L'une des méthodes pour estimer la cinétique de séchage à partir

de données expérimentales, est la modélisation en couche mince pour laquelle aucun travail scientifique n'a été entrepris. A ceci, s'ajoute l'étude des isothermes de sorption et de désorption, qui décrivent les relations entre la teneur en humidité et l'activité de l'eau dans les figues. Cette étude, s'impose comme étape primordiale avant toute expérimentation de séchage (Jung *et al.*, 2017). La compréhension de ces échanges thermodynamiques est d'une grande importance pour la conception et l'optimisation de l'équipement de séchage, l'emballage des aliments, la prévision de la qualité et la stabilité des figues pendant le stockage (Jung *et al.*, 2017).

La figue est largement connue pour contenir des quantités importantes de graines, au nombre et taille différents, et qui concourent au goût et à la saveur du fruit frais et sec (Gaaliche *et al.*, 2011). Cet aspect est fortement tributaire du profil variétal, du stade de maturation et de la caprification (Solomon *et al.*, 2006 ; Trad *et al.*, 2013 ; Rosianski *et al.*, 2016). La figue reçoit un intérêt particulier de la part de la sphère scientifique, et a été largement étudiée, mais dans son ensemble, pour ses métabolites primaires et secondaires, son activité biologique et ses propriétés antidiabétiques (Del Caro & Piga, 2007 ; Slatnar *et al.*, 2011 ; Veberic *et al.*, 2016). Les graines, cependant, ont été lésées, et très rares sont les travaux ayant concerné leur teneur en huile, son profil en acides gras et leurs propriétés biochimiques. Leur détermination, des composés bioactifs et de leurs antioxydants, pourrait servir de base à l'amélioration des procédés industriels utilisant la figue comme matière première.

L'ensemble des aspects directeurs susmentionnés constituent des piliers pour la valorisation de la figue et l'amélioration de sa compétitivité à l'échelle du globe. La réponse aux problématiques citées, aura pour effet de mieux orienter les programmes futurs de recherche et répondre aux exigences des industriels.

Hypothèses directrices de la thèse

Cette thèse a été conçue autour de plusieurs hypothèses scientifiques qui se déclinent comme suit :

- Comment s'exprime la variabilité du figuier au Maroc moyennant des descripteurs morpho-agronomiques et biochimiques pris singulièrement ? Et comment s'exprime-t-elle dans la combinaison des deux ?

- Quels sont les marqueurs morpho-agronomiques et biochimiques qui relatent la variance totale au sein du germoplasme étudié ? Comment se croisent-ils ?
- Lesquelles des empreintes biochimiques discriminent au mieux, et comment se répartissent-elles dans le fruit ?
- Jusqu'à quel degré la chimiométrie pourrait-elle être exploitée dans l'extrapolation de l'information ?
- Quel effet de la température sur les isothermes de la figue ? Y-a-t-il un effet d'hystérise ? Dans l'affirmatif, que pourrait en être la cause ?
- Y-a-t-il un effet variétal sur les propriétés thermodynamiques et sur le comportement du fruit sujet à un séchage en couche mince par convection ?
- Les isothermes de sorptions, sont-ils entropiques ou enthalpiques ?
- Quel est l'effet de la température et la vitesse sur le séchage en couche minces ? laquelle est plus influente ?
- Quelles sont les conditions optimales de séchage par un séchoir hybride ? Ceci est-il modélisable, et quel est le modèle mathématique qui décrit pertinemment ce processus ?
- L'exploitation des graines de la figue, apporte-elle une plus-value à la valorisation de l'espèce ?

Objectifs de la thèse

Eu égard aux hypothèses formulées, cette thèse vise à étudier la figue sur ses aspects agronomiques, biochimiques, mais aussi à explorer certaines applications industrielles et leur impact sur la qualité, pour une meilleure valorisation de l'espèce. Elle porte l'ambition de contribuer au développement durable de la filière au Maroc par l'apport de résultats tangibles et innovants. L'enjeu derrière la compréhension de ce fruit sur une triple dimension, est de valoriser les ressources génétiques du figuier en mettant en lumière les différentes potentialités agronomiques et biochimiques sur la base d'un criblage et un clustering d'une collection ex-situ. Il tente en plus de répondre, et aux questions liées à l'industrie, et à l'exploration de nouvelles voies de valorisation à grande valeur ajoutée.

Pour se faire, la démarche de notre recherche emprunte un cheminement voulant la vérification des hypothèses soulevées par les objectifs spécifiques suivants :

- Etudier les caractéristiques morphologiques, physico-chimiques, colorimétriques et biochimiques d'une large collection de figuier et en sortir l'ampleur de la diversité phénologique ;
- Déterminer la force de leurs corrélations, puis identifier les variables contribuant le plus à la variance totale et les plus pertinents dans la discrimination ;
- Classer la collection en pools de performances homogènes, afin d'orienter les futurs travaux de recherche dans l'optique d'une meilleure valorisation ;
- Poursuivre le criblage sur une taille réduite de cultivars contribuant le plus à la variabilité totale par des descripteurs biochimiques plus pointus ;
- Définir les empreintes moléculaires entre l'épiderme et la pulpe de la figue et en évaluer le pouvoir de discrimination ;
- Identifier les composés phénoliques contenus dans la figue et évaluer leurs concentrations dans l'épiderme et la pulpe ;
- Etudier le comportement de sorption de l'humidité et définir les propriétés thermodynamiques chez la figue et en prévoir les besoins en énergie ;
- Calculer l'activité de l'eau expérimentale et ajuster des modèles mathématiques de la littérature de sorption aux données expérimentales ;
- Etudier la cinétique de séchage de la figue et déterminer l'effet de la température et de la vitesse sur ce processus
- Déterminer la courbe caractéristique de séchage et calculer la diffusion effective et l'énergie moyenne d'activation ;
- Ajuster les courbes de séchage de la figue dans la conception des séchoirs solaires en utilisant plusieurs modèles semi théoriques et théoriques ;
- Exploration d'une nouvelle voie d'exploitation de la figue par l'extraction de l'huile que renferment ses graines et l'étude de sa composition en acides gras et ses propriétés antioxydantes ;
- Evaluation de l'effet variétal sur la teneur et les propriétés biochimiques de l'huile des graines de la figue.

Structure de la thèse

La structure générale de ce rapport de thèse s'articule autour de trois parties :

La première partie concerne l'Etat de l'art et est assignée à introduire l'espèce, son origine et son importance socio-économique et nutritionnel biochimique. Elle synthèse également les recherches scientifiques sur sa variabilité mondiale et locale et les voies de valorisation et leurs impacts sur la qualité de la figue.

La deuxième partie présente le design de l'étude et la méthodologie expérimentale.

La troisième partie relate les résultats et discussions en deux chapitres. Le premier chapitre concerne l'évaluation de la diversité morpho-agronomique, physico-biochimique d'une collection ex-situ du figuier, et dans lequel les composés phénoliques, les sucres et les acides sont étudiés sur un nombre limité de géotypes représentatifs.

Dans le deuxième chapitre, sont présentées des voies de valorisation post-récolte de la figue moyennant la déshydratation et l'exploration des vertus nutritionnels de des graines de la figue.

Ainsi, l'architecture de chacun des chapitre I et II, se présente comme suit :

Chapitre I. Criblage morpho-agronomique et physico-biochimique d'une collection ex-situ de 135 cultivars de figuier (*Ficus carica* L.)

Chapitre I.1 : Evaluation de la diversité génétique de la collection de figuier par combinaison de descripteurs morpho-agronomiques et physico-chimiques

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de la caractérisation et la classification d'une collection de figuier contenant 135 géotypes par l'association de 41 descripteurs morphologiques, physicochimiques et colorimétrique. L'évaluation de la diversité génétique par des méthodes statistiques multivariées permettra d'aboutir à une première classification du matériel génétique et de faire ressortir les variables contribuant à la variance totale.

Chapitre I.2 : Analyse et criblage des propriétés physico-biochimiques des figues entières

Concerne l'évaluation des propriétés phyto-chimiques de la collection afin d'apprécier la diversité phénotypique au sein des accessions. Le traitement statistique des

informations mènera à une nouvelle classification et permettra ainsi de mieux orienter la sélection de cultivars pour des fins industrielles.

Chapitre I.3 : Sélection raisonnée de cultivars prometteurs pour des analyses approfondies

Ce chapitre sera focalisé sur la détermination des variables les plus discriminantes et reclasser les différentes accessions par la combinaison des résultats des chapitres I.1 et chapitre I-2. La pertinence de cette combinaison sera ensuite évaluée par une analyse canonique. Après la validation du modèle, la taille des échantillons sera réduite et déclinera les cultivars les plus prometteurs par analyses statistiques inférentielles. Ce matériel génétique (les cultivars retenus) fera l'objet d'analyses plus approfondies par spectroscopie du proche infrarouge et chromatographie à haute pression en phase liquide (HPLC-DAD).

Chapitre II. Valorisation post-récolte des figes : cinétique des isothermes, modélisation de séchage et étude biochimique de l'huile des graines

Chapitre II.1 : Cinétique et modélisation des isothermes de sorption et propriétés thermodynamiques

Le présent chapitre a été conçu pour étudier les isothermes de sorption et de désorption et les propriétés thermodynamiques de deux variétés de figuier 'Kadota' et 'Sarilop'. Cette étude a analysé la cinétique d'absorption et de désorption de l'humidité de figue en présence de six solutions salines saturées (KOH, MgCl₂, K₂CO₃, NaNO₃, KCl et BaCl₂). Les données expérimentales ont été ajustées par trois modèles mathématiques visant de prédire les échanges hygrométriques des deux variétés du figuier et de définir les températures optimales pour la conception et l'étude de la cinétique de séchage.

Chapitre II.2 : Modélisation mathématique du séchage solaire en couche mince

Deux variétés parmi les plus cultivées dans les vergers marocains seront étudiées pour leur comportement au séchage à l'aide d'un séchoir convectif partiellement indirect. Ce travail vise à : (i) étudier la cinétique de séchage, (ii) déterminer l'effet de la température et la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage des variétés étudiées, (iii) déterminer la courbe caractéristique de séchage de la figue (CCS), (iv) définir la diffusivité effective et l'énergie d'activation moyenne, et ajuster les courbes de séchage en utilisant plusieurs modèles semi-théoriques.

Chapitre II.3 : Huile de figes comme autres voies de Valorisation lipochimique du figuier : Composition en acides gras, teneur phénolique totale et activité antioxydante

Pour son utilité nutraceutique et économique, Ce chapitre est axé sur l'exploration de l'huile des graines de figue, à travers sa caractérisation : acides gras, composés phénoliques totaux et les antioxydants. Les résultats seront exploités comme une nouvelle source d'aliments fonctionnels.

Enfin, ce travail s'achève par une synthèse méthodologique, une synthèse des résultats de l'étude et enfin les perspectives pour la poursuite de travaux futurs.

P

Partie I.

**Etat de l'art et
synthèse bibliographique**

Chapitre I. Généralités sur le figuier (*Ficus carica* L.)

I. Taxonomie

Le figuier (*Ficus carica* L. $2n = 26$), l'unique cultivé du genre *Ficus*, est l'un des plus anciens arbres fruitiers connus au monde (Storey, 1975 ; Vidaud *et al.*, 1997 ; Jona & Gribaudo, 1991), et l'une des plus anciennes espèces domestiquées depuis la révolution néolithique, environ mille ans avant les céréales (Hirst *et al.*, 1996 ; Flaishman *et al.*, 2008). Le qualificatif générique « *Ficus carica* L. », signifie « verrue » pour *Ficus* relativement au lait (latex) du figuier qui soigne la verrue et *carica* fait allusion à une région en Turquie (Oukabli *et al.*, 2008). Il appartient à la famille des Moraceae dans laquelle un très grand nombre d'espèces sont regroupées en 40 genres (Watson et Dallwitz, 2004 ; Singh *et al.*, 2011 ; Badgujar *et al.*, 2014). Le genre *Ficus* est le plus important avec plus de 800 espèces dans les régions tropicales et subtropicales de la planète (Lansky and Paavilainen, 2010 ; Singh *et al.*, 2011). Selon certains auteurs, le nombre augmente à environ 1000 espèces (Condit, 1947), 1500 (Sata, 1944), 1600 (Krause, 1953) voire à 2000 (Merrill, 1943) (Ferguson *et al.*, 1990). Ceci pourrait expliquer certains des grands désaccords et difficultés chez les botanistes dans la délimitation et la caractérisation des espèces de *Ficus* Spp. Parmi ces espèces, seulement quelques-unes ont des fruits comestibles, celles appartenant au *Ficus carica* L., étant les espèces les plus cultivées (Condit, 1969. Ferguson *et al.*, 1990, Watson et Dallwitz, 2004).

La région Asie-Australasie est la plus riche et diversifiée avec environ 500 espèces *Ficus* (Badgujar *et al.*, 2014). Le *Ficughs* en Afrique et les régions néotropiques, est relativement moins nombreux comprenant presque 110 et 130 espèces, respectivement. Environ plus que la moitié des espèces du genre *Ficus* sont Monoïques et le reste sont fonctionnellement dioïques (Berg, 2003). La classification du genre *Ficus* (figure 1) a considérablement changé au cours du temps et fait encore l'objet de recherches, de discussions et de controverses (Berg, 1989). Même le nombre d'espèces inclus dans la classification varie selon les auteurs de 600 à 2000 (Jiménez, 2016). Les principales subdivisions sont discutées et regroupées selon des traits morphologiques et fonctionnels, notamment en relation avec le système unique de pollinisation. La plus récente classification taxonomique est celle de Berg (2003), qui divise le genre *Ficus* en six sous-genres : *Pharmacosycea*, *Urostigma*, *Synoecia*, *Ficus*, *Sycidium* et *sycomorus*, fondée sur des aspects tels les pollinisateurs de la spécificité, le système de reproduction

(monoïque ou dioïque), la morphologie de son inflorescence, les caractéristiques anatomiques des feuilles et leur répartition géographique ; y compris les espèces *Ficus carica* L. appartenant au sous-genre *Ficus*.

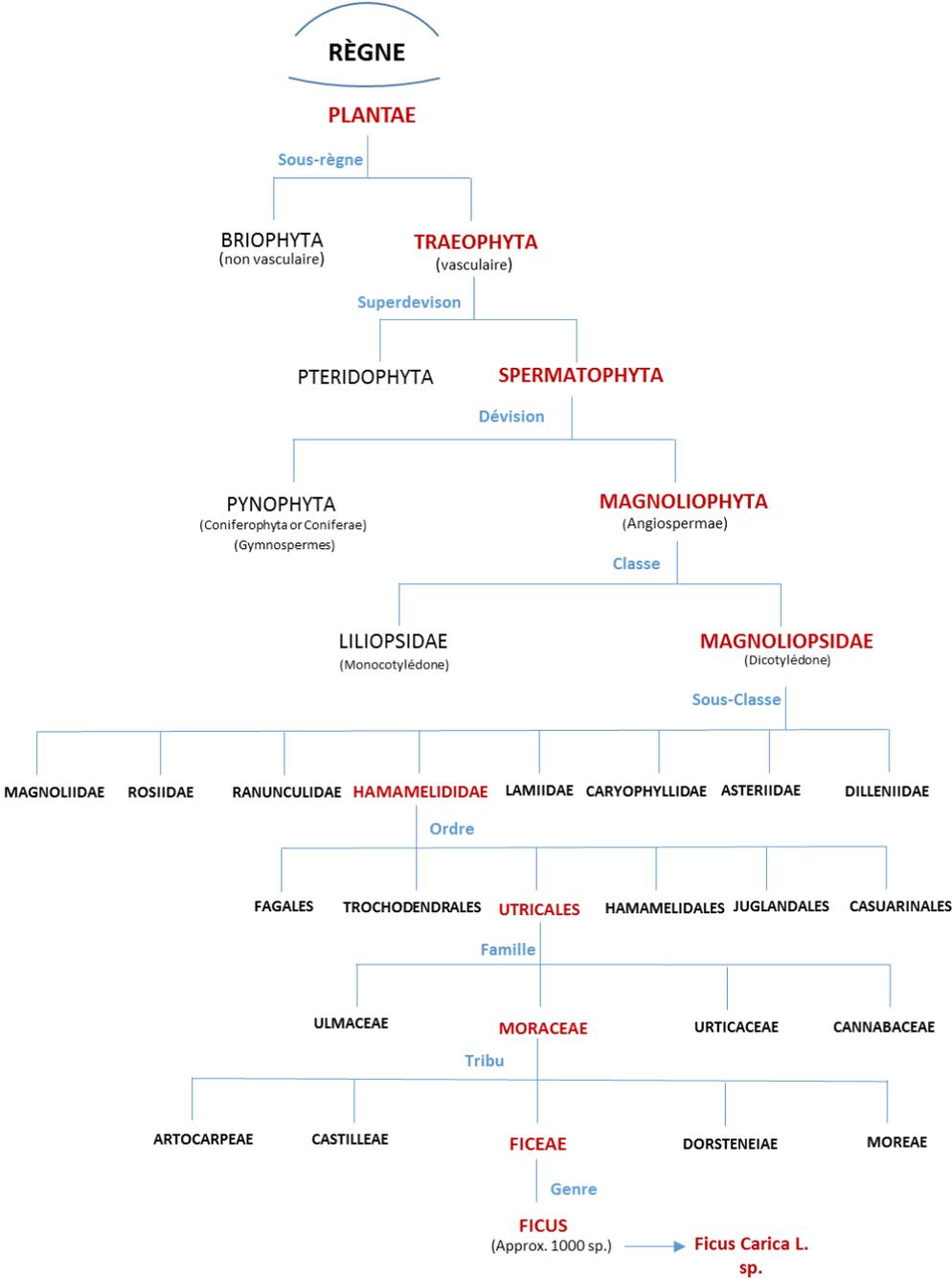


Figure 1. Classification taxonomique du figuier (source : López-Corrales y col., 2011 (adapté))

II. Origine géographique

La figue est un fruit sacré très anciennement connu dans le monde. Des études phylogénétiques récentes ont montré que les origines du genre *Ficus* remontent à environ 80-90 millions d'années, à la fin du Crétacé, bien que sa première expansion et celle de ses pollinisateurs aient été réalisées plus tard, lors de la séparation du continent Gondwana, il y a 60 millions d'années (Machado *et al.*, 2001 ; Datwyler et Weiblen 2004 ; Ronsted *et al.*, 2005).

Le figuier est probablement originaire d'Asie centrale. Des études récentes indiquent que *Ficus carica L.* est une évolution de *Ficus carica var. rupestris*, qui s'est répandue dans toute la Méditerranée avant d'être domestiquée et sélectionnée simultanément sur plusieurs points de cette zone (Khadari & Kjellberg, 2009). Comme l'olivier, la vigne, le palmier dattier ou la grenade, le figuier est une espèce fruitière largement connue depuis l'Antiquité et l'une des premières espèces cultivées au monde (Solomon *et al.*, 2006 ; Janick, 2005). Les preuves archéobotaniques indiquent l'utilisation de fruits parthénocarpiques et leur culture possible il y a environ 14 000 ans (Kislev *et al.*, 2006), trouvant des traces de leur culture dans plusieurs sites néolithiques et dans des tombes et des monuments égyptiens (Janick, 2005, 2006). Le figuier est mentionné aussi bien dans la Bible (Genèse) que dans le coran (Al-Tîn (95 :1-4)). Il a été cultivé par les Phéniciens, les Syriens, les Egyptiens et les Grecs dans tout le bassin méditerranéen au point où l'on pense que c'est une plante indigène à ces milieux (Oukabli *et al.*, 2008). Cette espèce a joué un rôle important dans la mythologie grecque, étant utilisée dans les cérémonies religieuses et offerte comme prix dans les jeux olympiques depuis l'antiquité (Flaishman *et al.*, 2008).

Les figues sont citées dans les anciens écrits romains (écrits de Cato et Theophrastus et dans l'Iliade et l'Odyssée d'Homère) (c.a 850 B.C) où les figuiers ont été cultivés sur l'île de Paros (Grèce). Les Phéniciens et les Grecs étaient responsables de la dispersion de cette culture dans le vieux monde. De la Grèce, le figuier s'est répandu à travers le nord de la Méditerranée et dans les terres adriatiques au sud de l'Italie (Janick, 2006). L'utilisation de la figue apparaît également référencée sous l'Empire romain, comme étant de la plus haute qualité dans tout l'Empire. Environ 29 variétés de cette espèce ont été énumérées (Ferguson *et al.*, 1990). Avec l'invasion arabe, elle s'étend rapidement de l'Afrique du Nord à l'Espagne et au Portugal. À partir du XVe siècle, les missionnaires espagnols et portugais

ont introduit et propagé leur culture au Nouveau Monde par Cuba, le Pérou, le Mexique, l'Argentine et plus tard aux États-Unis. Actuellement, le figuier est cultivé sur les cinq continents et est largement étendu par les pays du bassin méditerranéen à climat tempéré, où il végète dans de nombreux sols et climats en raison de sa tolérance à la sécheresse et à la salinité (Stover *et al.*, 2007, Flaishman *et al.*, 2008, Crisosto *et al.*, 2011, López-Corrales *et al.*, 2011).

III. Description botanique

1. Description végétative

1.1. Aspect général de l'arbre

L'arbre du figuier a évolué à travers les âges d'une plante sauvage à un arbre cultivé très apprécié pour ses valeurs mythiques, religieuses et nutritives et pour sa rusticité (Oukabli *et al.*, 2008). Cette espèce est connue par ses feuilles caduques à croissance et à propagation rapide, de sorte qu'elles ont tendance à être plus grands en largeur qu'en hauteur (Stover *et al.*, 2007). De volume variable selon son environnement, l'arbre du figuier, a une tige à moelle creuse lui conférant une souplesse et une facilité d'arcure des branches (Oukabli *et al.*, 2008), mais ont tendance à se casser facilement. La hauteur de l'arbre à la maturité diffère selon les génotypes de 9 à 12m (Janick, 2006), mais atteint habituellement une hauteur pouvant varier entre 3 et 10m (figure 2) (Vallejo *et al.*, 2012).



Figure 2. Fiquier (*Ficus carica* L.). Source : Domaine expérimental d'Ain Taoujdate

1.2. Système racinaire

L'arbre du figuier possède un système racinaire à grande densité (Oukabli *et al.*, 2008 ; Pereira *et al.*, 2017), formé par des racines fibreuses abondantes et robustes. Vu la structure de ce système, l'arbre est capable d'exploiter d'une façon optimale l'eau et les nutriments disponibles dans le sol (Pereira *et al.*, 2017). Dans les écosystèmes pluviaux, les racines explorent de grandes profondeurs à la recherche de l'humidité du sous-sol, cependant dans les zones irriguées, le système racinaire est plutôt superficiel (Melgarejo, 2000).

1.3. Bourgeons

Chaque tige présente à son extrémité un bourgeon terminal avec des bourgeons latéraux à l'aisselle de chaque feuille (Oukabli *et al.*, 2008, Jiménez, 2016). Les bourgeons végétatifs sont pointus et se distinguent par leur taille plus petite, leur forme conique et leur emplacement apical. Les bourgeons floraux ont une forme arrondie et se distinguent quant à eux, par leur grande taille et leur emplacement latéral. Par ailleurs, le nombre des bourgeons floraux est extrêmement dépendant de la dernière récolte (Ferguson *et al.*, 1990) mais également des conditions climatiques (Condit, 1932).

1.4. Feuilles

Les feuilles du figuier ont une couleur vert foncé qui se contraste fortement avec les nervures presque blanches (Ferguson *et al.*, 1990). Elles peuvent être différenciées par leur forme, taille, sinus, marge, couleur, texture, pétiole, présence de cystolithes et par leurs odeurs. Selon Miller (1768), Mauri (1939a) et Condit (1941), ces caractéristiques sont suffisamment stables pour aider à l'identification des cultivars (Ferguson *et al.*, 1990). Elles sont pétiolées, larges, pubescentes, cordiformes, dentées et sinueuses (Melo Leote, 1900 ; Vallese, 1909 ; Esterlich, 1910 ; Pereira Coutinho, 1913 ; Bobone, 1932 ; Mauri, 1939b).

2. Biologie florale

2.1. Fleurs

Les fleurs du figuier se trouvent dans le sycone (Ferguson *et al.*, 1990). Celui-ci est une inflorescence invaginée dont les fleurs sont regroupées dans une structure en forme

d'urne et une cavité tapissée de nombreuses fleurs femelles uniovulées et de quelques fleurs mâles (figure 3). Le sycone n'est accessible que par une ouverture opposée au pédoncule, appelée ostiole (Oukabli *et al.*, 2008). Cette constitution de l'inflorescence influence le processus de la pollinisation qui ne peut être effectuée que par l'intermédiaire d'un insecte pollinisateur spécifique au figuier appelé « blastophage » (*Blastophaga psenes* L.) (Verkerke, 1989 ; Ferguson *et al.*, 1990 ; Oukabli *et al.*, 2008 ; Pereira *et al.*, 2017). Cette protogynie stricte ne rend la pollinisation possible qu'entre figes différentes. La fermeture plus ou moins hermétique de l'ostiole empêche tout apport de pollen par le vent (anémophilie) ou par des insectes non spécialisés ne pouvant se reproduire dans les figes. De ce fait, le blastophage et la fige ont besoin obligatoirement l'un de l'autre pour assurer leur reproduction ; il s'agit d'un cas de mutualisme obligatoire et spécifique (Boucek, 1988).

La différenciation des fleurs féminines en fleurs longistylées et brévistylées est commune à toutes les espèces de *Ficus*. Une telle différenciation est essentielle pour le figuier, car sinon, les insectes pollinisateurs omniprésents se développeraient dans toutes les fleurs femelles, ce qui entraverait la production des graines (tableau 1).

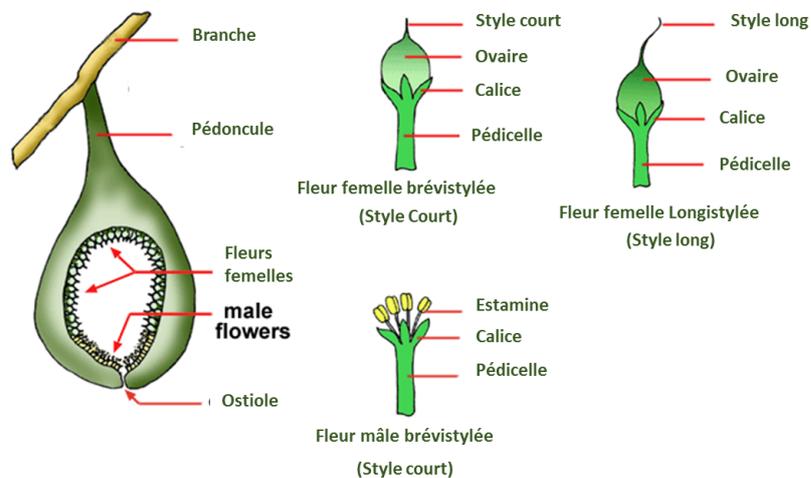


Figure 3. Morphologie de la fleur du figuier (*Ficus carica* L.) (source : Armstrong, 2006 (modifiée))

Tableau 1. Différences entre le caprifiguiier et le figuier femelle selon certains caractères et fonctions floraux (source Valdeyron et Lloyd, 1979 (adapté))

Type d'arbre	Caractéristiques de sycone	Comportement de bloastophage	Différences fonctionnelles
Caprifiguiier (mâle)	Fleurs mâles (staminées stériles) et fleurs femelles brévistylées (à style court)	Fécondation mais aussi ponte des œufs dans les fleurs femelles par l'ovipositeur	Fonctionnellement mâles
Figuier (femelle)	Fleurs femelles longistylées (à style long)	Seulement pollinisation sans ponte d'œufs	Fleurs femelles fertiles

2.2. Fruit

Le figuier (*F. carica L.*) est caractérisé par une inflorescence dite sycone qui produit un fruit multiple (figure 4). A la maturité, le fruit devient une structure à pulpe molle, creuse et charnue à l'intérieur souvent appelée « réceptacle ». Ce dernier désigne une structure charnière portant plusieurs carpelles (chaque fleur contenue dans le sycone possède son propre réceptacle) (Ferguson *et al.*, 1990). Les figues possèdent une ouverture apicale, opposée au pédoncule, couverte par des écailles appelées « Ostioles ». Pomologiquement, la figue est le sycone mature. Botaniquement cependant, la figue est classée comme fruit composé de l'inflorescence entière. Ainsi, les vrais fruits sont les centaines d'embryons fécondés qui se transforme en graines au niveau de l'endocarpe (Condit 1941).

La forme du fruit varie significativement en fonction des variétés, sur la base d'un ensemble de critères (ratio longueur/largeur, emplacement de la largeur maximale, symétrie selon l'axe vertical, etc.). Les figues, se distinguent également par la couleur de l'épiderme de la pulpe, la longueur du cou et du pédoncule, le diamètre de l'ostiole, la présence des stries et des fissures, ... etc.

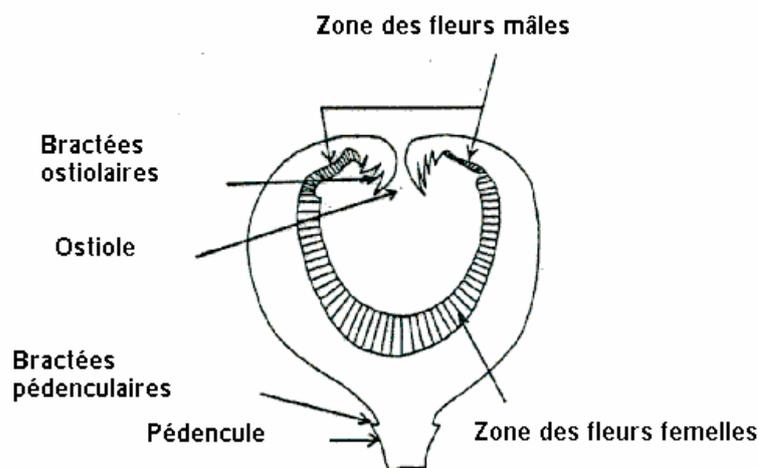


Figure 4. Coupe longitudinale d'une fige (source : Oukabli et al., 2008)

3. Types de production

Le caprifigier produit trois séries de bourgeons à fruits pendant chaque saison de croissance. La première série donne la récolte de printemps appelée « *profichi* » apparaissant à l'aisselle des feuilles, sur le nouveau bois. Ce type de fruit finit son développement vers le mois de juin de la même année. La seconde série donne la récolte d'été appelée « *mamme* ». Ces fruits naissant généralement en été (juillet-août), passent l'hiver sur l'arbre (visibles au cours de la dormance de l'arbre) et terminent leur développement au printemps suivant (Avril-Mai) (Oukabli *et al.*, 2008). La troisième série donne la récolte d'hiver appelée « *manne* » (Dufrenoy, 1934).

Les Figuiers, quant à eux, portent deux types de récoltes :

- Figes de la première récolte ou figes fleurs (*breba crop*) : Elles sont formées sur les rameaux défeuillés de l'année précédente, passent l'hiver au stade 'grain de poivre' pour reprendre leur développement au printemps. L'évolution des figes fleurs ne nécessite pas de pollinisation, et sont parthénocarpiques (Crane 1948 ; Ferguson *et al.*, 1990 ; Oukabli *et al.*, 2008) ;
- Figes de la 2ème récolte ou figes d'automne (*main crop*) : les figes non retardées sont formées à l'aisselle des feuilles des rameaux en croissance au cours de la même saison. Certaines variétés du figuier domestique, dites « unifères », ne

produisent que les figes d'automne. D'autres, dites « variétés bifères », donnent, en plus, une production de figes fleurs. Un décalage de quelques semaines est toujours observé entre les époques de maturité de ces deux types de production. Les deux types de fruits exercent, l'un sur l'autre, une compétition chez les variétés bifères. Ainsi une forte production en figes d'automne mène à un avortement plus élevé de la récolte de figes fleurs de l'année suivante (Oukabli *et al.*, 2008).

IV. Importance de la culture de figuier

1. A l'échelle mondiale

La culture du figuier s'est propagée dans toutes les régions tropicales et subtropicales du monde. La surface cultivée dépasse 308 460 ha, avec une production de 1 050 459 t en 2016 (FAOSTAT, 2018). Les principaux pays producteurs sont situés dans la région méditerranéenne (figure 5) qui est le centre de diversité génétique du figuier (Raymond and Rousset, 1995 ; Myers *et al.*, 2000), bien que la culture ait également été établie dans des endroits aussi éloignés que les États-Unis, le Brésil, la Chine, l'Afrique du Sud ou le Japon. La Turquie est en tête de la production mondiale avec 24%, suivie de l'Égypte, le Maroc, l'Algérie et l'Iran. La production de ces cinq principaux pays représente environ 70% du total (FAOSTAT, 2018). La Turquie est également le premier pays exportateur de figue, dont 70% concerne les figes sèches (70 000 t), suivie de l'Afghanistan, les États-Unis, l'Espagne, la Syrie et la Grèce (figure 6). Les principaux importateurs sont l'Allemagne, la France, l'Italie et les États-Unis (FAOSTAT, 2016).

En Europe, l'Espagne est le plus grand producteur avec environ 40271 t représentant 25% de la production européenne et 3,8% de la production mondiale, suivie par l'Albanie, l'Allemagne, le Portugal, l'Italie, la Grèce, le Monténégro, la France et la Croatie. Au cours des 20 dernières années, il y a eu une diminution globale de la superficie cultivée d'environ 7% et une augmentation de la production et des rendements de 5 à 12% (FAOSTAT, 2018).

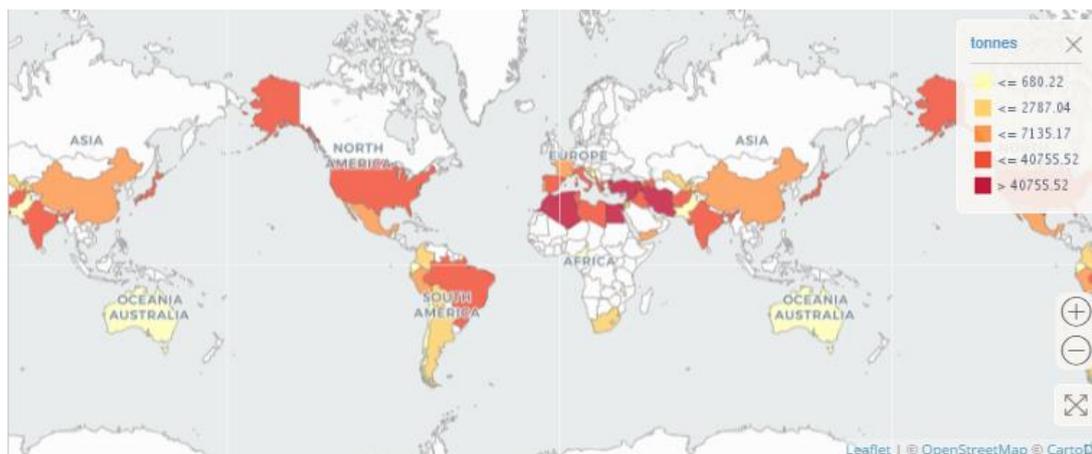


Figure 5. Cartographie des productions de figes (moyenne entre 1994 et 2016) (source : FAOSTAT, 2018)

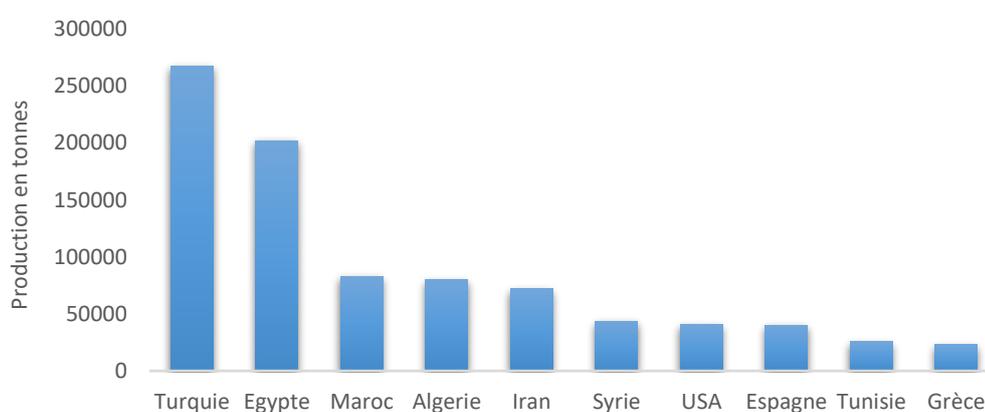


Figure 6. Principaux pays producteurs de la figue au monde (source FAOSTAT, 2018)

2. A l'échelle nationale

Le figuier est une espèce clé des agroécosystèmes marocains, principalement au Rif où sa culture est ancestrale, jouant ainsi un rôle important dans de nombreuses dimensions de la vie sociale, économique et culturelle. La culture s'étend sur une superficie d'environ 60500 ha avec une production estimée à environ 138000 t de figes fraîches, soit un rendement moyen d'environ 2,3 t/ha. La production nationale avoisine 7,9 % de la production mondiale de figes et le Maroc se classe au 3ème rang des pays producteurs au monde (FAOSTAT, 2018).

Bien que cette espèce soit très ancienne, sa culture a été considérée à importance secondaire avec des localisations particulières de production. L'intérêt insuffisant accordé par l'état à cette filière durant les années antérieures au Plan Maroc Vert,

comparativement à l'olivier et à d'autres espèces fruitières, ne lui a pas permis d'atteindre un niveau de développement en matière d'extension des superficies et de valorisation de la production. Néanmoins, depuis le lancement du Plan Maroc Vert en 2008, le figuier a regagné son intérêt comme espèce stratégique à côté de l'olivier, en raison probablement du développement du commerce international de la figue fraîche et sèche.

La culture concentrée essentiellement dans les provinces du nord où il représente environ 4% de la superficie arboricole, est souvent associée à des cultures intercalaires annuelles destinées à satisfaire les besoins vivriers, mais également à l'olivier (Oukabli, 2012). Cette culture structure le système agro-sylvo-pastoral de cette région et constitue une source importante de revenus grâce au commerce des figues séchées (Hmimsa, 2009). Les grandes régions de production sont Taounate et Chefchaouen qui fournissent plus de la moitié de la production nationale (~59 %) et le reste est produit au niveau de Tetouan (~8,4%), Alhouceima (~8,4%), Safi (~6,1%), Nador, (~3,5%), Rabat/Salé (~2,8%), Settat (~2%), Taza (~1,4%), Loukkos (~4.1%), Ouarzazate (~0,5%). La part de la production des figues séchées est d'environ 63 % dont à peu près 6% uniquement est valorisée (triée et emballés) (Oukabli, 2012). Cependant, Ces niveaux de rendement demeurent généralement faibles (2,5 t/ha contre un rendement potentiel de 5 à 6 t/ha). Ceci pourrait être dû, en plus d'une absence de train technique adéquat et d'une irrégularité des précipitations, à l'hétérogénéité du matériel génétique et au vieillissement des plantations (tableau 2).

Tableau 2. Répartition régionale de la production des figues fraîches et séchées selon la Direction du Développement des Filières de Production (MAPMDREF, 2016)

Régions	Superficie	Production totale de figues (T)	Production de figues séchées (T)	Pourcentage des figues séchées
Taounate	19946	25 000	6 000	31.7
Ouazzane/Chefchaouen	8140	25 000	6 000	31.7
Alhoceima	4520	9140	1830	9.7
Taza	1750	1570	0	0
Sidi Kacem	1096	245	60	3.2
Autres régions	12237			
Production totale Maroc	47 662	109 274	18 900	100

V. Diversité phénotypique chez le figuier

Le bassin méditerranéen est l'un des plus grands hotspots de biodiversité au monde. Il comprend plusieurs zones de refuge distinctes (Achtak *et al.*, 2009). De nombreuses espèces végétales ont été domestiquées dans ses agroécosystèmes traditionnels. Le figuier, est l'un des espèces emblématiques de la région et dont sa diversité a fait objet de plusieurs travaux de recherche. Plusieurs méthodes ont été empruntées pour mettre en exergue l'ampleur de cette diversité dans plusieurs pays de la méditerranée, tel que la Turquie (Çalışkan et Polat, 2008), la Tunisie (Mars *et al.*, 1998 ; Gaaliche *et al.*, 2012 ; Essid *et al.*, 2017), l'Iran (Mahdavian *et al.*, 2006 ; Khadivi *et al.*, 2018), l'Espagne (Sanches *et al.*, 2002), le Liban (Chalack *et al.*, 2005) et la Jordanie (Almajalia *et al.*, 2012). Ces études ont indiqué qu'une grande diversité de caractères pomologiques qui pourrait être utilisée comme un système de marqueurs efficace pour discriminer les génotypes de figuiers. D'après ces travaux, la géométrie du fruit et sa couleur ont été les traits les plus importants dans la discrimination pomologique des génotypes. D'autres part, cette diversité a été davantage confirmée par des études moléculaires ayant confirmé que le figuier, contrairement aux espèces fruitières dont l'origine est hors la Méditerranée, a été sélectionné à partir de populations indigènes ayant développé des capacités d'adaptation au cours de leur longue période d'évolution. Dans ses études plusieurs marqueurs ont été utilisés tels que ISSR (Guasmi *et al.*, 2006 ; Ikegami *et al.*, 2009 ; Giancarla *et al.*, 2017), RAPD (Salhi-Hannachi *et al.*, 2006 ; Ikegami *et al.*, 2009 ; Metwali *et al.*, 2016) et SSR (Guasmi *et al.*, 2006 ; Ikegami *et al.*, 2009 ; Almajalia, 2012 ; Metwali *et al.*, 2016). Ces études ont mis en lumière un grand polymorphisme au sein du germoplasme étudié dans la littérature. De plus, elles ont montré que le figuier est une espèce de propagation clonale provenant d'autres parties du monde (Birmeta *et al.*, 2002, Parker *et al.*, 2007, Rival et McKey, 2008). La répartition des différences entre les génotypes indique que cette diversité naît de la reproduction sexuée et seulement marginalement par mutation somatique (Hardy et Vekemans, 2002). D'autres descripteurs biochimiques ont également été utilisés pour évaluer la variabilité dans les génotypes du figuier, particulièrement la diversité en composés phénoliques dans les figues fraîches (Solomon *et al.*, 2006 ; Teixeira *et al.*, 2009 ; Gozlekci *et al.*, 2011 ; Faleh *et al.*, 2012 ; Ercisli *et al.*, 2012 ; Wojdyło *et al.*, 2016). Bien que, la taille d'échantillon est variable d'une étude à

l'autre, les résultats rapportés confirment la grande diversité au sein des ressources génétiques du figuier dans le pourtour méditerranéen

Au Maroc, de nombreuses recherches ont mis en relief l'originalité du patrimoine génétique national, renfermant une grande diversité phénotypique avec des spécificités géographiques distinctes (Ater *et al.*, 2005 ; khadari *et al.*, 2005c ; Ahtak *et al.*, 2009 ; Khadari *et al.*, 2010 ; Hmimsa *et al.*, 2012). Cette richesse est également conjuguée à l'intérêt croissant des consommateurs pour ce fruit ainsi qu'à la hausse des prix du marché, ce qui a favorisé le maintien de la biodiversité interspécifique et l'établissement de nouvelles plantations à destination régulière tant pour le marché frais que pour le séchage. Un certain nombre de travaux principalement celui mené par Ahtak *et al.* (2010) ont montré que dans les agroécosystèmes traditionnels, les variétés de figuiers sont de véritables clones, très diversifiés, souvent très locaux. Les agroécosystèmes traditionnels marocains sont à la fois des musées et des incubateurs de la diversité variétale du figuier, dans un système dynamique qui préserve les anciennes variétés locales et en génère de nouvelles localement (Khadari *et al.*, 2005b ; Hmimsa, 2012). Toutefois, la culture du figuier est, caractérisée par une remarquable hétérogénéité variétale où toutes les dénominations actuelles proviennent de la sélection effectuée par les agriculteurs locaux qui échangent leur matériel végétal, sélectionné directement dans la nature sur la base de critères qualitatifs et quantitatifs. Cette diversité est d'ailleurs difficile à estimer en raison de la confusion variétale. En effet, les problèmes de synonymes et d'homonymes ont également été signalés chez d'autres arbres fruitiers (Amandier, Olivier, Grenade, Pomme, etc.) (Condit, 1955 ; Giraldo *et al.*, 2005 ; Rekik *et al.*, 2008). De nombreuses études ont révélé le problème de la confusion variétale ou d'étiquetage erroné et des redondances dans le matériel génétique de figuier dans plusieurs pays comme la Tunisie (Saddoud *et al.*, 2007), la France (Khadari *et al.*, 2010), l'Espagne (Teoman *et al.*, 2017), la Turquie (Çalışkan, O. et Polat, 2012), l'Italie (Ciarmiello *et al.*, 2015). Au Maroc, le germoplasme local du figuier, en raison de l'échange de matériel végétal provenant de lieux proches, qui contribue aux pertes de diversité génétique, de synonymie et d'homonymie, est devenu un sérieux problème de gestion, d'utilisation, d'étude et de conservation des ressources génétiques du figuier. Le cas le plus frappant est celui de la variété "Ghoudan" dites polyclones (Ahtak *et al.*, 2009).

Chapitre II. Valeurs nutritionnelles de la figue

I. Composition nutritionnelle

Les figues sont présentes dans l'alimentation de différentes cultures depuis le début du XXe siècle et ont été très appréciées pour leurs excellentes caractéristiques nutritionnelles (Vinson, 1999 ; Slavin, 2006). Elles ont été décrites comme une source importante d'hydrocarbures, d'acides organiques, de minéraux (principalement le potassium, le calcium, le fer et exempts de sodium), d'antioxydants et de fibres. Ces composés nutritionnels sont présents à des niveaux élevés par rapport à d'autres fruits comme les bananes, les raisins, les oranges, les fraises et les pommes (Mitra, 1997 ; Vinson, 1999 ; Vinson *et al*, 2005 ; Solomon *et al*, 2006 ; Slavin, 2006 ; Crisosto *et al*, 2010). La teneur en eau des baies et des figues représente le composant majoritaire et le plus important, comme dans les autres fruits, avec des quantités comprises entre 70 et 80 % (tableau 3). Il est pratique de récolter les fruits lorsque la teneur en eau est plus élevée, afin qu'ils soient plus turgescents et mieux appréciés. Toutefois, l'excès d'eau les rend plus sensibles au développement des microorganismes et, par conséquent, à la diminution de leur durée de vie.

Tableau 3. Composition de la figue fraîche en éléments nutritionnels (Varela-Moreiras *et al.*, 2013, Département Américain de l'agriculture et Service de Recherche (US. Department of Agriculture, Agricultural Research Service : USDA), 2016).

Valeur nutritionnelle de la figue (teneurs par 100 g de poids frais)			
Macronutriments		Vitamines	
Eau	80,3	A (Beta-carotène) (µg)	8
Carbohydate	13	B1 (Thiamine) (mg)	0,06
Fibres	2,9	B2 (Riboflavin) (mg)	0,05
Protéines	1,3	B3 (Nicotinic acid) (mg)	0,5
Lipides	0,5	B6 (Pyridoxine)(mg)	0,11
		C (acide ascorbique) (mg)	2
		Minéraux	
Macroéléments		Microéléments	
K (mg)	270	Fe (mg)	0,6
Ca (mg)	40	Zn (mg)	0,3
P (mg)	22,5	Mn (mg)	0,04
Mg (mg)	20		
Na (mg)	2		
Cl (µg)	18		
Apport énergétique (Kcal)			65

1. Glucides

Les figues sont une source importante des glucides, représentant 13 à 16% du poids du fruit. Ces composés sont principalement représentés par le glucose, le fructose, et le saccharose (Melgarejo *et al.*, 2003 ; Aljane *et al.*, 2007 ; Veberic *et al.*, 2008b ; Caliskan et Polat, 2011 ; Vemmos *et al.*, 2013). La teneur en glucose serait comprise entre 2503 mg / 100 g (Slatnar *et al.*, 2011) et 15 890 mg / 100 g de fruits frais (Melgarejo *et al.*, 2003) et le fructose de 1916 mg / 100 g (Aljane *et al.*, 2007) à 11 900 mg / 100 g de fruits frais (Caliskan et Polat, 2011) (tableau 3). Seules des traces de saccharose ont été mesurées dans les figues analysées (Veberic *et al.*, 2008b ; Vemmos *et al.*, 2013) et dans le jus extrait. (Melgarejo *et al.*, 2003). Caliskan et Polat (2011) ont rapporté de faibles teneurs en saccharose dans 76 accessions de figues méditerranéennes locales, tandis que, dans d'autres, le saccharose n'a pas été détecté. D'autres auteurs signalent également que ce sucre n'est pas présent dans le jus de figue (Sugiyama *et al.*, 1991) ou qu'il ne se distingue pas clairement des autres sucres. Le saccharose est le principal glucide de translocation des feuilles vers d'autres parties de la plante, y compris les fruits. La faible concentration de saccharose dans les figues pourrait être le résultat de processus anaboliques et de la respiration pendant le développement des fruits. La faible teneur en saccharose peut également être causée par une activité invertase élevée au cours de la maturation des fruits (Vemmos *et al.*, 2013). En revanche, plusieurs espèces sont caractérisées par une accumulation de saccharose et de fructose dans leurs fruits mûrs. Ce dernier est formé à partir de sorbitol, qui est transféré des feuilles aux fruits sous forme de saccharose (Vemmos *et al.*, 2013).

2. Acides organiques

La teneur en acides organiques est importante pour le développement des fruits. Les fortes teneurs en acide malique et citrique sont parmi les caractéristiques de la famille des Moracées. Différentes études font état des teneurs en d'acide malique variant de 20,2 mg/100 g (Pande et Akoh, 2010 ; Slatnar *et al.*, 2011) à 461 mg/100 g (Veberic *et al.*, 2008b ; Pande et Akoh, 2010), et de mg/100 g du poids frais du fruit. Il a été démontré chez les pêches que la teneur en acide citrique, même en petites quantités, ajoute un plus à l'acidité des fruits que l'acide malique (Colaric *et al.*, 2005). Le goût sucré des fruits est corrélé non seulement avec les niveaux de différents sucres, mais surtout avec certains

acides, tels l'acide citrique et shikimique. La présence d'acides organiques spécifiques, même en petites quantités, peut influencer le goût des fruits et les rendre moins sucrés, malgré leur teneur élevée en sucre (Colaric *et al.*, 2005). Comme pour la composition des acides organiques des fruits, Sugiyama *et al.* (1991) ont signalé une teneur plus élevée en acide citrique que pour l'acide malique du jus préparé à partir de figes. L'acide malique et l'acide citrique ont été identifiés comme les principaux acides organiques de la fige, alors que les acides succinique, fumarique, shikimique et oxalique ont été détectés en faibles quantités ne dépassant pas 20 mg/100 g de poids frais (FW) (Pande et Akoh, 2010 ; Veberic *et al.*, 2008b). Par conséquent, ces acides n'ont probablement pas d'influence significative sur les caractéristiques gustatives de la fige. (Veberic *et al.*, 2008b). La comparaison des teneurs en acide malique et en acide citrique de la fige avec celle d'autres fruits, montre que les niveaux sont beaucoup plus bas que ceux contenus des pommes, des prunes, des abricots, etc. Cependant, ces teneurs sont comparables à celles de certains fruits à baies, tels les fraises (Mikulic-Petkovsek *et al.*, 2013a).

3. Fibres

En plus des sucres, des acides organiques les figes sont aussi riches en fibres alimentaires (2.9%) du poids frais (tableau.3) et 5.8% pour les figes séchées (Jeong et Lachance, 2001 ; Vinson, 1999 ; Vinson *et al.*, 2005 ; in Dueñas *et al.*, 2008, Solomon *et al.*, 2006). En effet elles contiennent des quantités relativement élevées de fibres crues atteignant parfois 1230 mg/100g dans les figes sèches (Vinson *et al.*, 2005). Plus de 28 % de ces fibres sont solubles, ce qui engendre un effet positif sur la santé humaine en contrôlant la glycémie et le taux de cholestérol, ainsi qu'en contribuant à la perte de poids (Vinson, 1999). Il prévient également la dégénérescence musculaire et facilite le transit intestinal grâce à son effet laxatif. Plusieurs études associent une alimentation riche en fibres à des effets positifs dans la prévention de ces maladies (Ramulu *et al.*, 2003 ; Vicente *et al.*, 2009). Cependant, ces effets varient selon le régime alimentaire général, le mode de vie et la réaction de l'individu (Vicente *et al.*, 2009). Par conséquent, ces fruits sont recommandés pour toutes les personnes pour leur apport naturel de sucres et de fibres en général et en particulier, pour ceux qui ont besoin d'un apport énergétique supplémentaire (Vicente *et al.*, 2009).

4. Protéines

La teneur en protéines dans les figes est relativement faible et varie généralement entre 0,75 et 1,2% du poids total du fruit (Varela-Moreiras *et al.*, 2013 ; USDA, 2016). Dans les figes sont présents 17 acides aminés essentiels tels l'acide aspartique, l'acide glutamique, la proline, l'alanine, la sérine et la leucine entre autres (Lianju *et al.*, 2003), avec de faibles quantités de méthionine, de cystéine et de tryptophane

5. Matière grasse

Les niveaux de graisses dans la fige sont généralement faibles. De faibles teneurs des phytostérols ont été rapportées par Jeong et Lachance (2001). Cependant les acides gras seraient principalement localisés au niveau des graines de la fige dont les ratios par rapport à la masse totale de la fige sont très faibles. Les figes renferment des quantités considérables de graines, qui diffèrent par leur nombre et leur taille et contribuent au goût et à la saveur des figes fraîches et séchées (Gaaliche *et al.*, 2011). Cet aspect dépend fortement du profil variétal, du stade de maturation et de la caprification (Solomon *et al.*, 2006 ; Rosianski *et al.*, 2016).

Les graines ont une teneur en huile allant jusqu'à 30 % caractérisée par l'abondance de l'acide linoléique. Les autres acides gras présents sont les acides linoléique, oléique, palmitique et stéarique (Joseph et Raj, 2011). Les acides gras de l'huile de fige sont composés d'acides gras insaturés, ce qui indique que l'huile de fige devrait faire partie de l'alimentation humaine en raison de ses bienfaits pour la santé et ainsi sa production commerciale devrait être encouragée. L'utilisation directe de cette huile comme additif alimentaire ou phytochimique, est possible (Carneiro *et al.*, 2013). Malgré ces vertus, cet aspect ne semble pas intéresser la sphère scientifique, et rares sont les études qui ont mis en évidence la composition en acides gras au niveau des graines et surtout l'importance de l'effet variétal dans ses fluctuations.

6. Minéraux

Les figes sont riches en minéraux (tableau 3), dont les teneurs sont généralement deux à quatre fois importantes que dans d'autres fruits comme les pommes, les abricots et les fraises (Venu *et al.*, 2005). Les principaux minéraux sont le potassium (K), le calcium (Ca) et le phosphore (P) (Vinson, 1999 ; Aljane et Ferchichi, 2009). Ces minéraux se trouvent en concentrations élevées estimées à 270 mg/100 g pour K, 35 mg/100 g pour

Ca et 22,5 mg/100 g pour P (Varela-Moreiras *et al.*, 2013 ; USDA, 2016). Les teneurs en magnésium (Mg) et en Chlore (Cl) se distinguent également avec respectivement 17 et 14 mg/100 g. En raison de leurs propriétés chimiques, les minéraux jouent un rôle important dans le régime alimentaire humain. Le calcium contribue dans la formation des cellules osseuses et prévient la décalcification en combattant l'ostéoporose (Slavin, 2006). Le potassium aide à abaisser la tension artérielle, réguler le rythme cardiaque, favoriser la contraction musculaire et à libérer l'énergie des graisses, des glucides et des protéines. Les minéraux jouent également un rôle dans la qualité organoleptique de la figue. Le potassium, par exemple, participe à la régulation du pH et donc l'acidité du fruit, tandis que le calcium intervient dans la texture du fruit (Vicente *et al.*, 2009).

7. Vitamines

Parmi les vitamines présentes au niveau de la figue fraîche, figurent les vitamines A (8 µg/100 g), B1 (thiamine, 0,06 mg /100 g), B2 (riboflavine, 0,05 mg/100 g) et B3 (niacine, 0,5 mg/100 g) entre autres (Varela-Moreiras *et al.*, 2013 ; USDA, 2016). En raison de sa richesse en vitamines, ce fruit est considéré comme une bonne source naturelle des agents antioxydants contre les radicaux libres, ainsi que pour la prévention des maladies cardiovasculaires, dégénératives ou du cancer (Vinson *et al.*, 1999 ; Ribeiro *et al.*, 2010). La teneur de la figue en vitamine C est relativement faible. Cette teneur est généralement de l'ordre de 2 mg d'équivalent d'acide ascorbique/100 g par. Un niveau très faible par rapport à d'autres fruits tels que le kiwi (118 mg/100 g), les oranges (53 mg/100 g) ou les fraises (57 mg/100 g) qui présentent des concentrations élevées (Vicente *et al.*, 2009 ; Varela-Moreiras *et al.*, 2013 ; USDA, 2016). La vitamine C comprend la somme de l'acide ascorbique (AA) et de l'acide déshydroascorbique (ADA). L'acide ascorbique est probablement l'antioxydant hydrosoluble le plus largement distribué dans les légumes (Oliveira *et al.*, 2009) et il est sensible à l'oxydation en passant rapidement à l'acide déshydroascorbique. La figue, comme les autres fruits tropicaux, sont plus riche en AA qu'en ADA. La teneur en vitamine C est généralement influencée par les conditions environnementales et les pratique culturelles (Martínez-Madrid *et al.*, 2001).

8. Composés volatiles

Les composés volatils présents au niveau de la figue fraîche influent de manière significative sa qualité sensorielle, principalement due au goût et à l'arôme du fruit, est

surtout due à un mélange complexe de plusieurs composés chimiques (Riu-Aumatell *et al.*, 2004). La concentration en ces composés est généralement faible (0,001-0,01 %) mais a un impact important sur la qualité du fruit (Oliveira *et al.*, 2010). Parmi les composés volatils décrits dans les figes, on trouve principalement des esters, dont beaucoup ont des arômes typiques de fruits, aldéhydes, terpènes, alcools, cétones et lactones (Gozlekci *et al.*, 2011). Oliveira *et al.* (2010) ont identifié jusqu'à 59 composés volatils dans la peau et la chair des figes des variétés typiques portugaises. Parmi les composés identifiés, l'acétaldéhyde, l'acétate d'éthyle, le méthanol, l'éthanol, l'hexanal, le (E)-2-hexanal, l'alcool benzylique, le benzaldéhyde, l'octanal, ainsi que les monoterpènes et sesquiterpènes comme le limonène, β - carifilène, germacrène-D, parmi tant d'autres, sont les aldéhydes et terpènes les plus présents. De plus, ces auteurs ont également montré que ces composés se retrouvent dans une plus grande diversité dans la pulpe que dans la peau et l'existence de différences entre les profils des variétés verte et noire. D'autres auteurs tels que Gozlekci *et al.* (2011) et Grison-Pigé *et al.* (2002) ont également identifié des composés volatils dans la variété turque 'Bursa Siyahi', dans les figes originaires de Chine. Ces composés volatils peuvent être influencés par le génotype, l'environnement, la maturité des fruits et des facteurs technologiques (Douillard et Guichard, 1990).

9. Composants bioactifs

Les figes renferment plusieurs composés organiques contribuant à la promotion de la santé humaine (Solomon *et al.*, 2006 ; Veberic *et al.*, 2008a ; Çalişkan et Polat, 2011) car ils bloquent l'effet nocif des radicaux libres impliqués dans de nombreux processus dégénératifs liés au stress. Ces composés ont une action fonctionnelle et sont appelés bioactifs, ou phytochimiques. Dans ce groupe de composés, les composés phénoliques ou polyphénols se distinguent.

9.1. Composés bioactifs hydrophiles (composés phénoliques)

Aussi appelés composés phénoliques ou polyphénols, sont des composés organiques, produits du métabolisme secondaire des plantes. Ce sont des composés hydrosolubles, contrairement à d'autres antioxydants présents dans ces plantes comme les caroténoïdes et les tocophérols qui sont liposolubles (Howell *et al.*, 2001). Leur disposition structurelle peut être libre (acides phénoliques) ou conjuguée (glycosides-*O*-glycosides), c'est-à-dire la façon dont les composés phénoliques apparaissent

généralement unis par une liaison *O*-glucosidique ou une liaison *S*-glucosidique avec des monosaccharides comme le glucose, le galactose, l'arabinose, le rhamnose, la xylose, les acides glucuroniques et galacturoniques. Ils peuvent également se lier aux acides carboxyliques, aux acides organiques, aux amines et aux lipides (Khatib et Vaya, 2010). Ces composés possèdent un cycle aromatique (phénol) ou plus (polyphénols) et des doubles liaisons conjuguées à partir desquelles ils exercent leur action antioxydante. En raison de cette action antioxydante, les composés phénoliques ont acquis un grand intérêt ces dernières années, car on leur attribue des activités biologiques bénéfiques pour la santé, dont principalement leurs effets vasodilatateurs, anticancérigènes, anti-inflammatoires, bactéricides, stimulateurs de réponse immunitaire, antiallergiques, antiviraux ou inhibiteurs des enzymes prooxydantes (Faleh *et al*, 2012 ; Mawa *et al*, 2013). D'autre part, ces composés contribuent au goût amer, à l'astringence et/ou à l'arôme des fruits et affectent les propriétés sensorielles des fruits telles que la saveur et la couleur (Tomás-Barberán et Espin, 2001 ; Khatib et Vaya, 2010).

Il existe de nombreuses études sur les figes qui démontrent l'action antioxydante de ces composés (Slavin, 2006 ; Çalışkan et Polat, 2011 ; Ercisli *et al.*, 2012) comme par exemple contre l'oxydation des lipoprotéines présentes dans le plasma sanguin (Vinson, 2005). D'autres études ont démontré une action antibactérienne contre *Proteus mirabilis* (Soni *et al.*, 2014). Enfin, Joseph et Raj (2011) ont observé, dans les figes sèches, l'effet inhibiteur *in vitro* dans la prolifération de diverses lignées cellulaires cancéreuses. D'autre part, des auteurs tels que Solomon *et al.* (2006), Del Caro et Piga (2008), Veberic *et al.* (2008b), Çalışkan et Polat (2011), Vallejo *et al.* (2012) et Kamiloglu et Capanoglu (2013) ont montré que la teneur en composés phénoliques est supérieure dans les variétés à peau noire que dans celles à peau blanche ou verte, qui se manifeste par un effet antioxydant supérieur. Ils ont également rapporté une teneur en polyphénols plus élevée dans l'épiderme que dans la chair. Vallejo *et al.* (2012) ont rapporté des teneurs totales en polyphénols des variétés de figuier cultivées à Alicante oscillant entre 19 et 140 mg/100 g de poids frais, tandis que pour les variétés cultivées en Turquie, les teneurs se situaient entre 17 et 105 mg/100 g de poids frais (Çalışkan et Polat, 2012).

Les polyphénols ou composés phénoliques sont divisés en deux catégories selon leur structure chimique : les non flavonoïdes et les flavonoïdes (Gimeno, 2004) (figure 7).

- 1) Les phénols dits non-flavonoïdes comprennent les acides phénoliques, qui sont classés en deux grandes catégories : les acides benzoïques (C6-C1) et les acides cinnamiques (C6-C3). Ce groupe comprend également les stilbènes (C6-C2-C6).
- 2) Les flavonoïdes sont les anthocyanines-*O*-anthocyanines, les flavonols, les flavanols (flavan-3-ols), les flavanones, les flavones, les flavones, les isoflavonoïdes et les chalcones.

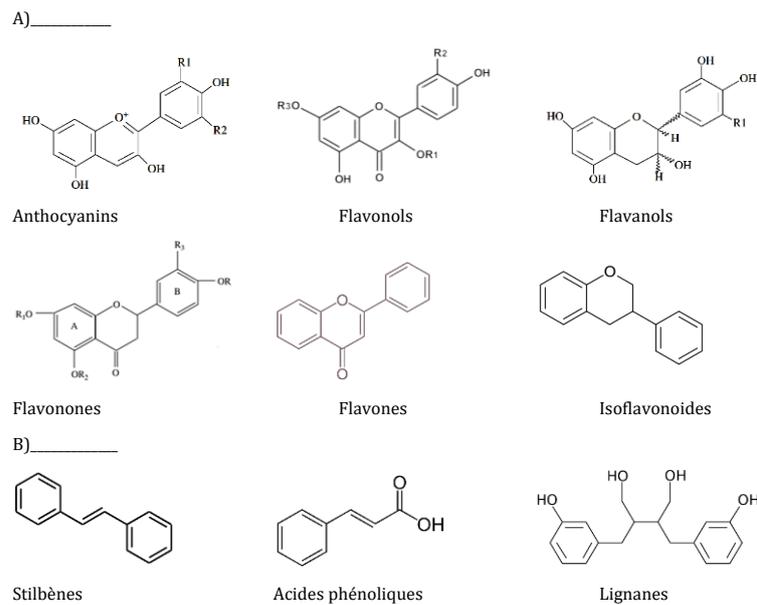


Figure 7. Structures des polyphénols : A) flavonoïdes B) non flavonoïdes. Source : Khatib et Vaya, 2010 ; Moreno et Peinado, 2012.

9.2. Acides phénoliques

Les acides phénoliques sont présents dans les vacuoles des cellules de la pulpe et de l'épiderme des fruits, mais sont plus abondants dans l'épiderme (Moreno et Peinado, 2012). Ils sont incolores dans une solution aqueuse d'alcool, mais peuvent développer une couleur jaune lorsqu'ils sont oxydés. Bien qu'ils n'aient pas d'arôme ou de saveur particulière, ils sont les précurseurs de certains phénols volatils formés par des micro-organismes. Les acides phénoliques sont répartis en deux classes qui sont les acides hydroxybenzoïques et les acides hydroxycinnamiques, que l'on trouve partout dans les matières végétales à des niveaux variables (Moreno et Peinado, 2012). Les dérivés les plus courants de l'acide benzoïque sont l'acide gallique, l'acide ellagique, l'acide p-hydroxybenzoïque, l'acide vanillique et l'acide seringuique. L'acide gallique, en raison de

sa large distribution dans les légumes, est fréquemment utilisé pour exprimer les concentrations de phénols totaux dans les baies et les figes (Slatnar *et al.*, 2011 ; Çalişkan et Polat, 2011, 2012). Veberic *et al.* (2008b) ont décrit l'acide gallique comme étant le deuxième acide phénolique le plus abondant dans les figes, bien qu'ils aient aussi trouvé de petites quantités d'acide seringué. L'acide gallique et ses formes glucosylées ont été trouvés en fortes concentrations dans les figes de la variété "Miljska figa" (à peau foncée) cultivée en Slovénie et ces composés sont également caractéristiques de cultures telles que les mûres, fraises ou framboises (Hakkinen *et al.*, 1999). L'acide gallique se caractérise par une biodisponibilité élevée par rapport aux autres polyphénols et a un effet positif sur les cellules cancéreuses *in vitro* (Tomas-Barberan et Clifford, 2000). Les acides cinnamiques ou hydroxycinnamiques apparaissent généralement sous forme d'esters et constituent le groupe de composés phénoliques le plus largement distribué dans les fruits en général. Ce groupe comprend les acides p-coumarique, caféique, férulique et synapique. Dans les fruits, il est très fréquent que l'estérification de l'acide du café avec l'acide quinique pour former de l'acide chlorogénique qui a été décrit dans les figes et les feuilles de figuier comme l'un des principaux acides (Veberic *et al.*, 2008b ; Del Caro et Piga, 2008 ; Vallejo *et al.*, 2012 ; Russo *et al.*, 2014). D'autre part, Oliveira *et al.* (2009) ont également identifié dans les figes et les composés des feuilles de figuier tels que les acides 3-O-caféo-ilquinique et 5-O-caféo-ilquinique et l'acide férulique dans les variétés portugaises. Kamiloglu et Capanoglu (2013) ont décrit les quantités d'acide p-coumarique et d'acide chlorogénique dans les figes fraîches et ont observé une diminution de ces acides dans les figes sèches après le séchage. L'acide chlorogénique est un agent antioxydant important, tout comme les catéchines. L'acide chlorogénique et les catéchines ont montré des effets similaires contre les dommages oxydatifs dans les cellules épithéliales gastriques humaines (Graziani *et al.*, 2005).

9.3. Anthocyanes

Les anthocyanes sont des pigments responsables des couleurs rouge, bleu et violet présentes dans les fruits. Ces pigments solubles dans l'eau sont situés dans la vacuole et se caractérisent par leur stabilité au pH acide, ce qui favorise la copigmentation (Del Caro et Piga, 2008 ; Valero et Serrano, 2010). Il s'agit d'une molécule d'anthocyanidine, l'aglycone, à laquelle un sucre ou un monosaccharide est fixé par une liaison O-

glucosidique. Les principales anthocyanidines présentes dans les fruits sont la cyanidine, qui est peut-être la plus courante, suivie de la delphinidine, la péonidine, la pélargonidine, la pétunidine et la malvidine (figure 8). Dans les fruits frais, ils sont généralement liés aux sucres. La cyanidine glucosylée avec une ou deux molécules de glucose est la structure la plus abondante dans les fruits, bien que d'autres structures glucosylées puissent également être trouvées dans la composition totale des anthocyanes (Bordignon-luiz *et al.*, 2007).

La couleur de l'épiderme et de la pulpe des figes dépend de la concentration en pigments, tels que la chlorophylle, les caroténoïdes et principalement les anthocyanes (Ercisli *et al.*, 2012). L'attrait des figes est principalement dû à leur grande diversité de couleurs, du violet au vert dérivés de ces pigments. Les cyanidines et les pélargonidines ont été décrites comme les anthocyanes les plus abondantes dans les figes (Solomon *et al.*, 2006 ; Dueñas *et al.*, 2008 ; Vallejo *et al.*, 2012). Parmi les cyanidines présentes dans les figes, le cyanidine-3-O-rutinoside se distingue, représentant plus de 75% des pigments totaux présents dans les variétés à peau foncée (Solomon *et al.*, 2006 ; Del Caro et Piga, 2008 ; Dueñas *et al.*, 2008 ; Vallejo *et al.*, 2012), suivi du cyanidine-3-O-glycoside et du pelargonidine-3-O-rutinoside. De plus, la teneur en peau de ces composés est plus élevée que celle de la pulpe (Solomon *et al.*, 2006 ; Ercisli *et al.*, 2012). De même, Crisosto *et al.* (2010) ont observé une augmentation de ces pigments au cours de la maturité des variétés telles que 'Brown Turkey' et 'Mission'. Par ailleurs, ces anthocyanes ont suscité un intérêt particulier en raison de leurs effets antioxydant et antimutagènes, ainsi que pour leurs effets anti-inflammatoires, anticancéreux, et antibactériens. Flaishman *et al.*, (2008) ont mis en évidence une forte corrélation entre la couleur des figes et la teneur totale en phénols et en flavonoïdes tels que les anthocyanes et leur capacité antioxydante.

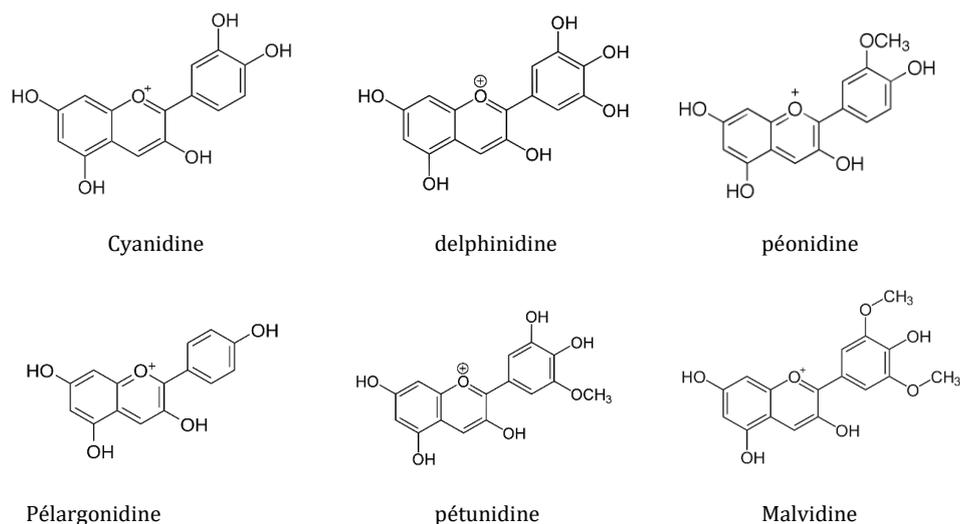


Figure 8. Structure des principaux anthocyanes présents dans les fruits.

9.4. Flavonoles

Parmi les principaux flavonoles décrits dans les fruits figurent la quercétine et le kaempférol qui sont les composés les plus abondants dans le règne végétal. La rutine ou quercétine-3-O-rutinoside et le kaempférol-3-O-rutinoside sont les structures les plus représentatives de ce type de composés. Ces composés se trouvent principalement dans les graines et les fleurs, ainsi que dans le vin, le thé vert, le thé noir et le soja. Ces composés jouent un rôle essentiel dans la protection contre le stress oxydatif et ont des effets thérapeutiques sur un grand nombre de pathologies, dont les maladies cardiovasculaires, l'athérosclérose ou le cancer (Martínez-Flórez *et al.*, 2002).

Oliveira *et al.* (2009), Vallejo *et al.* (2012) et Russo *et al.* (2014) ont décrit brièvement et figurativement la présence de quercétine-3-O-rutinoside suivie de quercétine-3-O-glucoside comme les flavonols les plus abondants dans ces fruits. Ces composés se sont avérés plus concentrés dans la peau que dans la chair. Veberic *et al.*, (2008b) ont également trouvé des quantités plus élevées de quercétine-3-O-rutinoside dans la variété 'Miljska figa' (peau foncée et chair rouge) que dans les cerises, pêches et abricots. Enfin, Texeira *et al.* (2006) ont identifié ce flavonole dans les feuilles de figuier (figure 9).

9.5. Flavanoles (Flavan-3-oles)

Parmi les flavan-3-ols prédominants dans les fruits, la (+) catéchine et son isomère, la (-) épicatechine, se distinguent par leur caractère monomère. Ils sont considérés comme un groupe de composés importants dans l'alimentation méditerranéenne. Veberic *et al.* (2008b) ont trouvé plus de (+) catéchine que d'(-) épicatechine dans les variétés de figues. L'(-) épicatechine a été également rapportée dans les figues fraîches et séchées de la variété 'Sarilop' (Nakilcioğlu et Hişil, 2013). D'autre part, ils peuvent se présenter sous forme de structures oligomères appelées proanthocyanidines ou procyanidines oligomères caractérisées par des associations dimériques de (+) catéchine et (-) épicatechine ou simplement de monomères du même type, dotés de puissantes propriétés antioxydantes. Un autre avantage des proanthocyanidines est qu'elles traversent la barrière hémato-encéphalique, ce qui n'est pas le cas des autres antioxydants. Les propriétés antioxydantes des proanthocyanidines réduisent le risque de maladie coronarienne en maintenant la perméabilité vasculaire et en prévenant les dommages causés par les radicaux libres aux parois artérielles (Howell *et al.*, 2001).

Vallejo *et al.* (2012) ont trouvé principalement des monomères de (+) catéchine et (-) épicatechine dans des variétés cultivées en Espagne et dans certaines d'entre elles, des dimères. Les catéchines, du point de vue physiologique pour le consommateur, ont un grand potentiel antioxydant en évitant l'oxydation des lipoprotéines de basse densité (LDL) (Gonçalves *et al.*, 2004). Le reste des composants phénoliques, tels que les stilbènes, les flavanones, les flavones, les isoflavonoïdes et les chalcones se retrouvent en plus petites proportions dans les figues courtes et les figes.

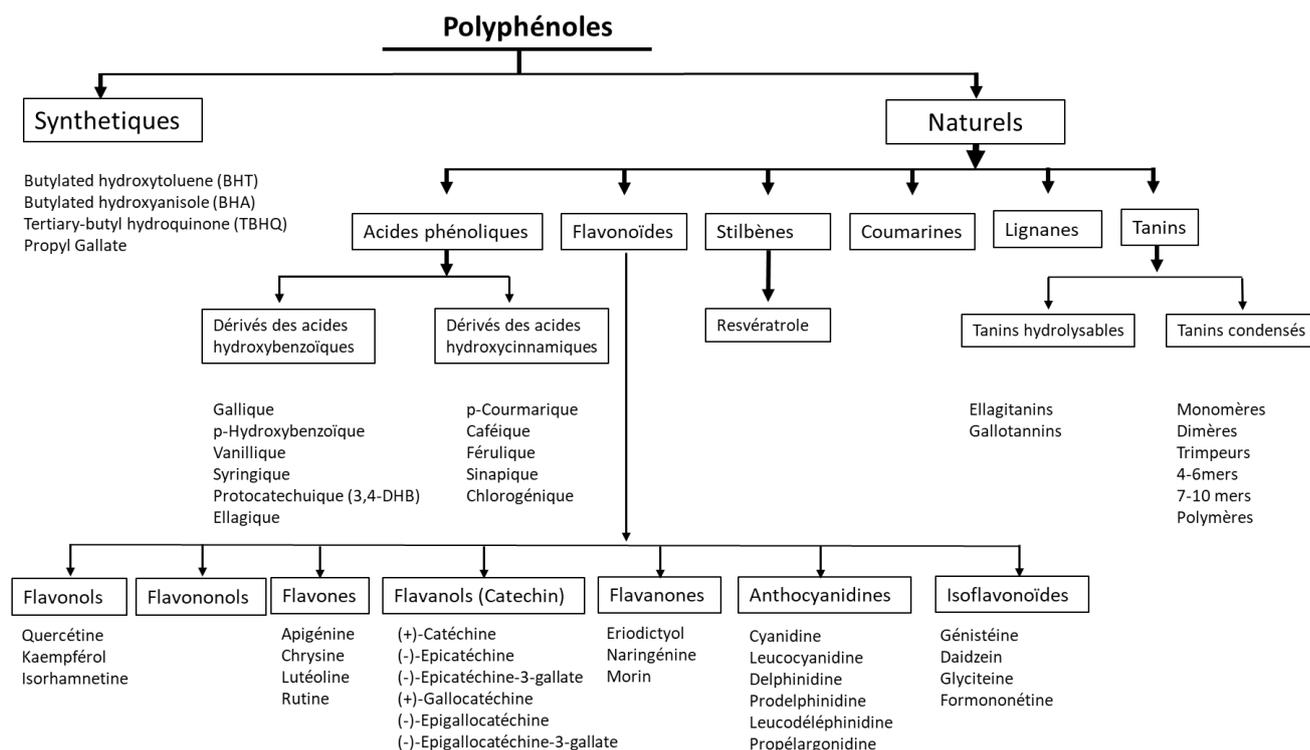


Figure 9. Classification des polyphénols antioxydants (Shahidi et Ambigaipalan, 2015).

10. Composants bioactifs lipophiles

10.2. Caroténoïdes

Les caroténoïdes sont des pigments liposolubles de la famille des terpènes, largement répandus dans la nature et présents dans tous les organismes photosynthétiques. Il existe plus de 600 caroténoïdes, dont 40 sont des caroténoïdes alimentaires consommés régulièrement dans le cadre d'une alimentation équilibrée (Khatib et Vaya, 2010). Ils sont considérés comme des métabolites secondaires des plantes et sont divisés en deux grands groupes structuraux : xanthophylles oxygénées telles que la lutéine, la zéaxanthine et la violaxanthine et les carotènes hydrocarbonés tels que β -carotène, α -carotène et lycopène (Kopsell et Kopsell, 2010) (figure 10). Ces composés sont responsables des colorations jaunes à rouges. Par contre, la couleur verte des fruits immatures est principalement due à la chlorophylle, alors que chez les fruits matures, la présence de caroténoïdes est plus importante (Hornero-Méndez *et al.*, 2000). Les principaux caroténoïdes présents dans les figes sont la lutéine, la cryptoxanthine, le lycopène, β -carotène et α -carotène. Le lycopène est le caroténoïde le plus abondant dans les figes avec 0,32 mg/100 g de poids frais, suivi

de la lutéine et du β -carotène avec 0,08 et 0,04 mg/100 g de poids frais respectivement (Khatib et Vaya 2010).

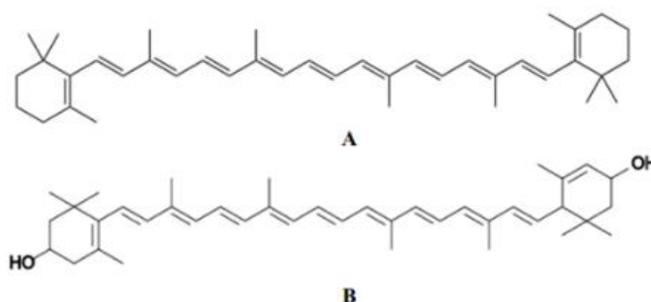


Figure 10. Structure chimique du β -carotène (carotène) (A) et de la lutéine (B) (Fernández-León et al, 2010).

10.3. Chlorophylle

La chlorophylle est un groupe de pigments qui sont largement répandus dans la nature. La chlorophylle « a » et la chlorophylle « b » (figure 11) sont les principales chlorophylles des plantes. Ils ne diffèrent que légèrement dans la composition d'une chaîne latérale, la chlorophylle « a » a un groupe méthyle (-CH₃) tandis que dans « b » elle est formyle (-CHO). Dans les cellules photosynthétiques, la chlorophylle « a » est plus abondante et responsable de la photosynthèse que la chlorophylle « b » et est réparti dans un rapport 3:1 (Chen et Chen, 1993), bien que des facteurs environnementaux puissent modifier ce rapport (Lichtenthaler *et al.*, 1982). Kakhniashvili et al. (1987) ont identifié la présence des deux chlorophylles dans les variétés de figes "Turetskii korichnevyyi" et "Smena" d'une quantité totale de 25,3 et 10,7 mg/kg de poids frais respectivement.

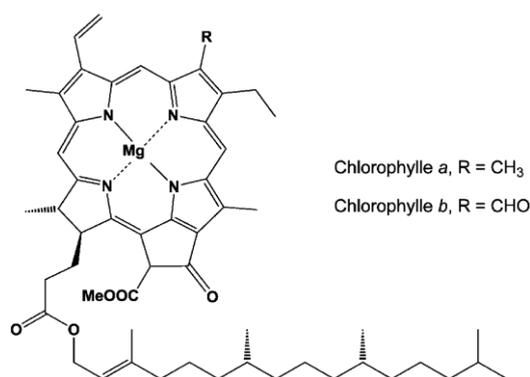


Figure 11. Structure chimique de la chlorophylle A et B (Fernández-León et al., 2010)

11. Activité de piégeage des radicaux libres et méthodes de détermination

La figue est l'un des fruits rapportés pour ses fortes qualités antioxydantes, qui est principalement attribuée aux composés phénoliques. Un antioxydant est une molécule qui ralentit ou empêche l'activité de l'oxydation des molécules. Les antioxydants mettent fin à ces réactions en chaîne en éliminant les intermédiaires radicaux libres et inhibent les autres réactions d'oxydation en s'oxydant eux-mêmes. Par conséquent, les antioxydants sont souvent considérés comme des agents réducteurs tels que les thiols, l'acide ascorbique, les polyphénols. Les antioxydants sont classés en deux grandes catégories, selon qu'ils sont solubles dans l'eau (hydrophiles) ou dans les lipides (hydrophobes). En général, les antioxydants solubles dans l'eau réagissent avec les oxydants présents dans le cytosol cellulaire et le plasma sanguin, tandis que les antioxydants liposolubles protègent les membranes cellulaires de la peroxydation lipidique (Sies, 1997).

Diverses méthodes sont utilisées pour étudier les propriétés antioxydantes chez les espèces végétales. Les essais DPPH, ABTS, FRAP et la capacité d'inhibition de la peroxydation des lipides (Lipid Peroxidation Inhibition Capacity « LPIC »), sont, entre autres, les plus utilisées. L'activité antioxydante ne doit pas être conclue sur la base d'un seul modèle de test antioxydant. Dans la pratique, plusieurs procédures d'essai *in vitro* sont effectuées pour évaluer les activités antioxydantes chez les végétaux. Un autre aspect est que les modèles d'essai des antioxydants varient à différents égards. Il est donc difficile de comparer pleinement une méthode à l'autre.

11.1. Activité de piégeage des radicaux DPPH

La molécule 1, 1-diphényl-2-picrylhydrazyl (α,α,α -diphényl- β -picrylhydrazyl ; DPPH) est caractérisée comme un radical libre stable en raison de la délocalisation de l'électron libre sur l'ensemble de la molécule, de sorte que celle-ci ne se dimérise pas, comme ce serait le cas pour la plupart des autres radicaux libres. La délocalisation de l'électron donne également naissance à la couleur violette foncée, caractérisée par une bande d'absorption en solution d'éthanol centrée à environ 517 nm (figure 12). Lorsqu'une solution de DPPH est mélangée à celle d'un substrat (AH) qui peut donner un atome d'hydrogène, cela donne la forme réduite avec la perte de cette couleur violette (Alam *et al.*, 2013).

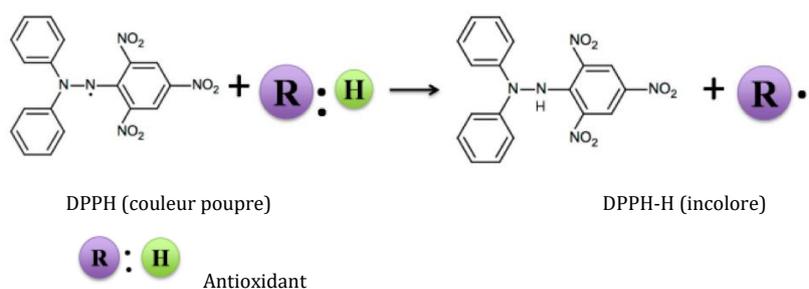


Figure 12. Mécanisme réactionnel intervenant lors du test DPPH entre le radical DPPH• et un antioxydant (R:H). (Fernández-León et al., 2010)

11.2. Décoloration des cations radicaux ABTS

L'activité antioxydante totale d'une molécule est déduite de sa capacité à inhiber le radical ABTS•+, obtenu à partir de l'ABTS (sel d'ammonium de l'acide 2,2'-azinobis-(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique)) comparativement à un antioxydant de référence : le Trolox® (acide 6-hydroxy-2,5,7,8-tétraméthylchroman-2-carboxylique), dont la structure moléculaire cyclique est similaire à celle de la vitamine E. L'antioxydant réduit les ABTS•+ en ABTS et les décolore. ABTS•+ est un radical stable qui ne se trouve pas dans le corps humain. L'obtention du radical cation résulte du contact de l'ABTS avec une enzyme de peroxydation (peroxydase metmyoglobine d'un oxydant (dioxyde de manganèse (Benavente-Garcia *et al.*, 2000) ou persulfate de potassium (Re *et al.*, 1999)). Le radical ABTS•+, en contact avec un donneur de H• conduit à l'ABTS+ (figure 13) et à la décoloration à 734 nm de la solution (Lien *et al.*, 1999). La cinétique de réaction de l'antioxydant étudié doit être examinée préalablement pour déterminer la fin de réaction. La capacité antioxydante en équivalent Trolox® (TEAC) correspond à la concentration (mmole/l ou mg/l) de Trolox® ayant la même activité qu'une même concentration unitaire de substance à tester (Alam *et al.*, 2013).

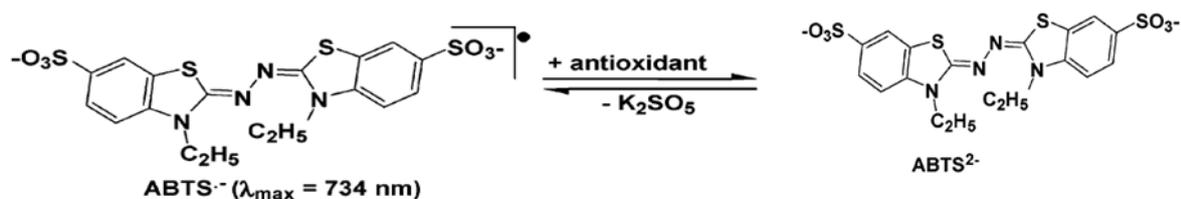


Figure 13. Mécanisme réactionnel entre le radical ABTS•- et un antioxydant. (Fernández-León et al., 2010)

11.3. Capacité de réduction des ions du fer (FRAP)

Cette méthode mesure la capacité des antioxydants à réduire les ions ferriques (Fe^{3+}). Elle est basée sur la réduction du complexe de fer ferrique et de chlorure de 2,3,5-triphényl-1,3,4-triaza-2-azoniacyclopenta-1,4-diène (TPTZ) à la forme ferreuse à faible pH. Cette réduction est contrôlée en mesurant la variation de l'absorption à 593 nm, à l'aide d'un spectrophotomètre à diodes (figure 14).

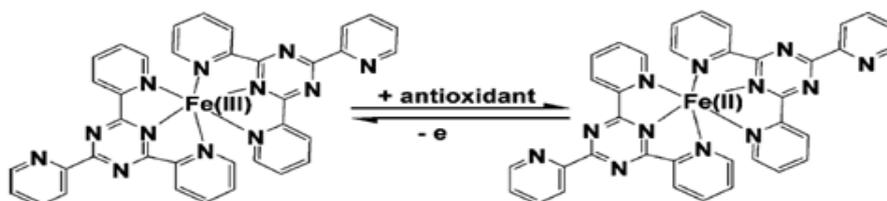


Figure 14. Mécanisme réactionnel intervenant lors du test FRAP entre le complexe tripyridyl-s-triazine ferrique (Fe^{3+})-TPTZ et un antioxydant (AH). (Fernández-León *et al.*, 2010)

11.4. Capacité d'inhibition de la peroxydation des lipides (LPIC)

Les espèces réactives de l'oxygène (ROS), comme le superoxyde, le radical hydroxyle, les radicaux peroxydes et l'oxyde nitrique, ont une nature radicale qui endommage les biomolécules, y compris l'ADN, les cellules, les protéines et les lipides, provoquant diverses maladies. Le test de blanchiment β -carotène pour évaluer l'activité antioxydante est l'une des méthodes couramment utilisées dans le domaine de la chimie alimentaire (Al-Saikhan, *et al.*, 1995). Le principe de cette méthode est basé sur la décoloration de la solution de β -carotène, de couleur jaunâtre, par réaction d'addition de lipide ou de radical peroxyde lipidique à une double liaison C=C du β -carotène. L'espèce radicale est générée par l'auto-oxydation de l'acide linoléique par chauffage sous atmosphère d'air. Lorsque l'antioxydant approprié est ajouté à la solution, la décoloration peut être retardée par la réaction concurrente entre β -carotène et antioxydant avec les radicaux soumis. La similitude structurale entre les fullerènes et le β -carotène, comme les molécules hautement conjuguées, permet l'évaluation précise de l'activité antioxydante par ce test de blanchiment β -carotène contrairement à d'autres méthodes comme le test de DPPH (Djordjevic *et al.*, 2004).

En effet, l'activité de piégeage radicalaire des caroténoïdes en donnant de l'hydrogène aux radicaux peroxy-lipidiques, les caroténoïdes peuvent améliorer l'oxydation des lipides (Lee *et al.*, 2003). Les radicaux peroxy-lipidiques (ROO•) provenant de l'oxydation des huiles peuvent être ajoutés à β -carotène (Car) et produire un radical carotène peroxy (ROO-Car•), en particulier à une pression d'oxygène supérieure à 150 mm Hg (Wayner *et al.*, 1984). Le radical peroxy carotène réagit avec l'oxygène triplet pour former le radical peroxy du carotène (ROO-Car-OO•) qui extrait alors de l'hydrogène d'une autre molécule lipidique et produit les radicaux lipides (R). Les radicaux lipidiques qui en résultent propagent la réaction en chaîne de l'oxydation des lipides (Iannone *et al.*, 1998), de sorte que le β -carotène agit comme un prooxydant (Figure. 15).

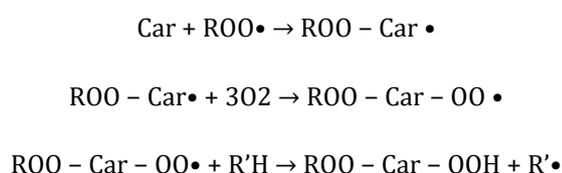


Figure 15. Réaction des radicaux β -carotène et peroxylipidiques. (Lee *et al.*, 2003)

II. Paramètres d'évaluation de la maturité des figues

1. Paramètres physico-chimiques

La qualité physico-chimique des figues est un aspect multifactoriel qui influence leur période de la récolte et leur adéquation au marché frais. Parmi ces paramètres, les traits géométriques, la teneur en solubles solides totaux (SST), l'acidité totale (AT), le pH et l'indice de maturité (IM=CSS/AT) se distinguent (Flaishman *et al.*, 2008 ; Crisosto *et al.*, 2010 ; Crisosto *et al.*, 2011). Tous ces paramètres, à leur tour, dépendent du génotype et de la maturité des fruits (Darjazi, 2011).

La **forme et taille** des figues dépendent en grande partie du génotype et de l'espèce. Ainsi la forme de la figue peut être ovoïde, turbinée, sphérique, cucurbitiforme, pyriforme et urcéolée (López-Corrales *et al.*, 2011). Le poids et le calibre sont des paramètres importants pour la commercialisation des figues fraîches et permettent la sélection et la conception de l'emballage le plus approprié pour la commercialisation de ces fruits.

La teneur en **solides solubles totaux** (SST) est liée à la douceur du fruit. La concentration des solides solubles varie généralement de 10 à des valeurs supérieures à 20 °Brix (IPGRI et CIHEAM, 2003). Ces valeurs varient considérablement d'une variété à l'autre et d'un stade de maturité du fruit à l'autre. Tsantili et al. (2010) a montré que les SST augmentent pendant la maturité en raison de l'augmentation des sucres réducteurs, principalement le fructose suivi par le glucose et par la transformation de l'amidon en sucres (Venu *et al.*, 2005). La douceur des figes est principalement due à la teneur en glucose et en fructose et légèrement moins au saccharose (Melgarejo *et al.*, 2003 ; Veberic *et al.*, 2008a ; Slatnar *et al.*, 2011 ; Çalışkan et Polat, 2012).

L'**acidité titrable** (AT) dépend fondamentalement de la teneur en acides organiques. Parmi les acides organiques majoritaires dans les figes figurent l'acide malique et l'acide citrique, qui montrent un comportement descendant tout au long de la maturité du fruit (Melgarejo *et al.*, 2003 ; Aljane et Ferchichi, 2009 ; Crisosto *et al.*, 2010 ; Slatnar *et al.*, 2011). Ce paramètre dépend également de la variété, du sol et des conditions climatiques, allant de valeurs supérieures à 0,05 à inférieures à 0,3 % d'acide citrique (IPGRI et CIHEAM, 2003). De même, le pH moyen des figes est d'environ 5-6, ce qui permet de le considérer comme un fruit légèrement acide (López-Corrales *et al.*, 2011).

Enfin, un autre paramètre important dans l'évaluation des figes est l'**indice de maturité** (IM) qui est défini comme le rapport entre SST et AT. Cet indice est en corrélation positive avec l'acceptabilité par le consommateur et est d'une grande importance dans le choix des variétés (Crisosto *et al.*, 2011). L'état de maturité est l'un des facteurs qui influencent le plus la commercialisation des fruits. Selon Crisosto *et al.* (2010) les figes récoltées à maturité avancée présentent un niveau plus élevé de SST et une AT plus faible et, par conséquent, un IM élevé et donc une meilleure appréciation par le consommateur que les fruits récoltés à maturité précoce (avant la maturité commerciale).

2. Paramètres sensoriels

En plus des indices de la qualité sensorielle tels que les piqûres d'oiseaux, les coups de soleil, les insectes et la pourriture, l'aspect extérieur et la couleur des figes sont parmi les principaux paramètres de la qualité sensorielle (Trad *et al.*, 2013). En effet, la couleur de l'épiderme et de la pulpe, est influencée par la concentration en d'anthocyanes et en

caroténoïdes, ainsi que la dégradation de la chlorophylle, qui se produit pendant la maturité du fruit (Crisosto *et al.*, 2011 ; Valero et Serrano, 2010). La plus forte concentration en ces composés se trouve dans l'épiderme, en particulier chez les variétés à peau foncée (Solomon *et al.*, 2006 ; Dueñas *et al.*, 2008 ; Vallejo *et al.*, 2012). Généralement, la couleur des épidermes varie du noir au violet, brun, vert, vert-jaune et au jaune, bien qu'il existe des variétés bicolores. L'épiderme est caractérisé par une couleur de fond et une couleur secondaire selon la variété et l'état de maturité. La couleur secondaire peut recouvrir complètement la couleur de fond du fruit à un stade avancé de la maturité. D'autre part, la succulence, la couleur et la saveur de la pulpe varient également selon le génotype et selon le stade de maturité (López-Corrales *et al.*, 2011). La couleur de la pulpe varie du violet au rouge, brun clair, rose et à l'ambré (figure 16).

III. Apport de l'approche FTIR spectroscopie Infra rouge

La spectroscopie infrarouge est une technique de choix pour l'analyse des composés organiques. De toutes les méthodes infrarouges, la plus utilisée est la spectroscopie infrarouge par transformées de Fourier (FTIR), car sa méthode d'acquisition des données et son traitement mathématique des résultats permettent une plus grande clarté et exactitude des mesures effectuées (Osborne, 2006, Papadopoulou *et al.*, 2011). La spectroscopie infrarouge est basée sur l'étude de l'absorption ou de la réflexion, par l'échantillon, des radiations électromagnétiques. Quand une molécule absorbe les radiations électromagnétiques, il y a une augmentation de son énergie totale. Elle passe d'un état stable à un état excité par absorption d'un photon (Papadopoulou *et al.*, 2011). Les absorptions des composés s'apparentent à une empreinte digitale qu'on appelle "spectre". Le développement de cette technique d'analyse a permis d'établir une corrélation entre la position de certaines bandes d'absorption maximum et les groupements fonctionnels des molécules examinées. Une analyse du spectre, permet d'en déduire les éléments de la structure du composé en question ou d'une matrice, ce qui permet de localiser les groupements fonctionnels caractéristiques de ces produits par FTIR.

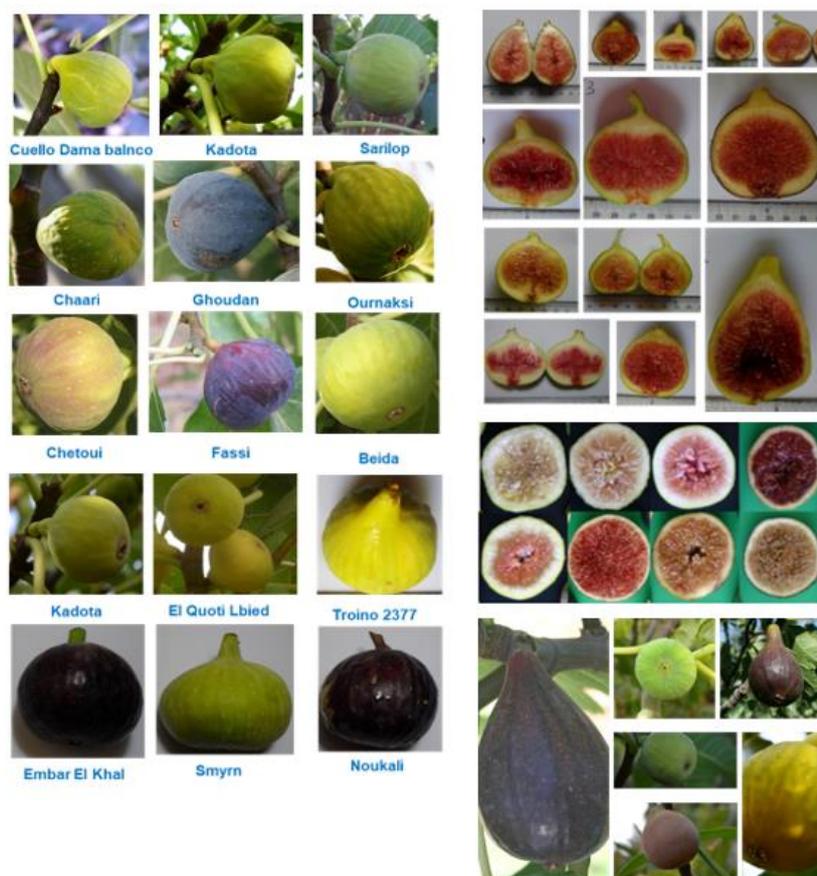


Figure 16. Variabilité de forme, taille, couleur de pulpe et d'épiderme des figes d'automne de la collection de la station expérimentale d'Ain Taoujdate (2018) (INRA-Meknès).

IV. Utilisation de la chimiométrie en analyse des aliments

La chimiométrie est devenue une technique importante pour une investigation plus rapide des résultats/informations et un temps de développement de produit plus court (Marini, 2013). Elle est, pour la plupart, appliquée pour au moins un des trois rôles de base à :

- Enquêter sur la nature de l'association dans l'information ;
- Suivre les propriétés des matériaux en continu ;
- Préparer et utiliser des modèles de classification multivariés.

Cette technique a la capacité d'analyser et de modéliser une grande variété de types de données pour un ensemble d'applications encore plus variées (Sarker et Nahar, 2015). La plupart des problèmes résolus par les méthodes chimiométriques concernent : (a) description, (b) classification et modélisation, (c) corrélation, d) regroupement, (e)

sélection des caractéristiques, (f) optimisation. Plusieurs méthodes statistiques sont utilisées pour aboutir à ses objectifs, dont les plus utilisées sont l'analyse en composantes principales et la classification ascendante hiérarchisée qui permettent de traiter des données multivariées et fournissent une grande discrimination des matrices objets d'analyse et de les classer en groupes homogènes (Marini, 2013).

Chapitre III. Procédés de conservation des figes par déshydratation

Les figes fraîches sont des fruits charnus, dont les teneurs en eau dépassent 80% et sont donc très périssables à température ambiante. A basse température et humidité élevée (4,44°-6,11°C, 75% d'humidité relative), les figes peuvent rester en bon état pendant 8 jours (Polat et Caliskan, 2008). Cependant, lorsqu'elles sont entreposées à l'environnement ambiant, leur conservation ne peut durer que 1 à 2 jours (Morton & Morton, 2004). Une façon de prolonger leur durée de conservation à plusieurs mois est de les congeler entières (Irfan *et al.*, 2013). Toutefois, ceci nécessite une réfrigération constante à grande échelle, ce qui demande des infrastructures développées et des investissements importants. Par conséquent, l'application de méthodes de conservation commodes et efficaces, telle que la déshydratation, s'avère une meilleure technique pour prévenir la perte des fruits (Polat et Caliskan, 2008).

Les techniques de séchage des fruits diffèrent et vont de la simple exposition au soleil jusqu'à l'utilisation de séchoirs industriels selon des conceptions et des principes différents.

1. Déshydratation osmotique (DO)

L'osmose est connue comme un processus de déshydratation partielle. Bien qu'il n'élimine pas suffisamment d'humidité pour être considéré comme un produit séché, le procédé a l'avantage de nécessiter peu d'énergie. Il fonctionne bien comme prétraitement avant le séchage par d'autres méthodes. L'application des DO aux fruits et, dans une moindre mesure, aux légumes, a retenu l'attention ces dernières années en tant que technique de production d'aliments intermédiaires humides ou en tant que prétraitement avant le séchage afin de réduire la consommation d'énergie ou les dommages causés par la chaleur (Jayaraman et Gupta, 1992). L'avantage de la Déshydratation osmotique est qu'il non consommatrice d'énergie et endommage moins le produit sur le plan thermique

puisque les températures plus basses utilisées permettent la rétention des nutriments (Rastogi et Niranjan, 2008). Le taux de transfert de masse pendant le DO est généralement faible. Toutefois, plusieurs techniques sont couplées à la DO pour améliorer le transfert de masse. Parmi ses méthodes, le sous-vide qui augmente la surface de masse disponible et la zone interfaciale (Rastogi et Raghava Rao 2004). Également, l'application d'une pression hydrostatique élevée endommage la structure de la paroi cellulaire, ce qui entraîne des modifications significatives de l'architecture tissulaire, laissant les cellules plus perméables. Ceci entraîne une augmentation des taux de transfert de masse pendant la DO (Rastogi et Niranjan, 2008). Les avantages de ce processus de prétraitement ont été largement rapporté dans la littérature sur les tomates (Correa *et al.*, 2016), les grenades (Khoualdia *et al.*, 2018), le kiwi (Nowacka *et al.*, 2014).

2. Séchage à l'air libre

La pratique du séchage à l'air libre ou au soleil direct implique l'exposition des produits agricoles au soleil pendant la journée. Généralement, le séchage à l'air libre se fait en laissant sécher les fruits in situ sur l'arbre ou les étaler au sol ou sur des sols en béton, qui peuvent atteindre des températures plus élevées en plein soleil (Kumar *et al.*, 2016). Du point de vue capacité, et malgré la nature très rudimentaire du procédé, le séchage naturel reste la méthode la plus courante de séchage solaire. En effet, les besoins en énergie, qui proviennent du rayonnement solaire et de l'enthalpie de l'air, sont facilement disponibles dans l'environnement ambiant et aucun investissement en capital n'est requis pour l'équipement. Bien que cette méthode de séchage soit écologique, l'exposition prolongée des produits à la lumière du soleil contribue à la dégradation de leur qualité biochimique et microbienne en raison de la lenteur du processus. La perturbation par les parasites, la contamination par la poussière, l'infestation par les insectes et la croissance microbienne sont entre autres les principaux problèmes courants du séchage direct au soleil en raison de l'exposition à l'environnement ouvert. Le séchage direct au soleil est associé à la perte de produits après la récolte, qui est estimée entre 30 et 40 % de la production totale dans les pays en développement (Kumar *et al.*, 2016). En raison de ces limitations, la qualité du produit obtenu peut être dégradée, parfois au-delà de la comestibilité. Tous ces inconvénients peuvent être éliminés en utilisant des méthodes de séchage modernes et écologiques.

3. Séchoir solaire

Les séchoirs solaires sont potentiellement capables de relever les défis susmentionnés du séchage des aliments et d'être l'alternative au séchage au soleil et au séchage mécanique avancé. Par rapport au séchage solaire direct, les séchoirs solaires utilisent des équipements et des systèmes supplémentaires pour capter l'énergie radiative de la lumière du soleil (Chua & Chou, 2003). Le système de séchage solaire présente de nombreux avantages en termes de qualité du produit séché, de performance et d'optimisation du système. Il est considéré comme une alternative au séchage au soleil peu fiable, tout en maintenant un bon rapport coût-efficacité, en fonction de la conception du séchoir et de l'accessibilité financière des agriculteurs. En général, les séchoirs solaires utilisés sur les produits agricoles utilisent de l'air chauffé à l'énergie solaire à 50-60 dans des conditions de température contrôlée et d'élimination de l'humidité, a ainsi permis d'obtenir un séchage parfait et une qualité de produit parfaite (Singh *et al.*, 2018).

De manière plus générale, les séchoirs solaires peuvent être différenciés en fonction du mode de circulation de l'air et de la contribution solaire du système comme le montre la figure 17. Deux types de circulation d'air sont utilisés dans les séchoirs solaires, à savoir la circulation active et la circulation passive. En mode actif, ou convection naturelle, l'air est chauffé et circule naturellement par la force de flottabilité due à la différence de densité de l'air, tandis que la convection passive ou forcée utilise une force externe, comme un ventilateur ou un ventilateur pour faire circuler l'air (Desa *et al.*, 2019). Pour chaque type de sécheur actif ou passif, différents modes de fonctionnement peuvent être utilisés pour réchauffer les matériaux. Les séchoirs solaires directs placent les cultures sous une couverture transparente afin que le rayonnement solaire chauffe directement à la surface des matériaux. Les modèles les plus populaires de séchoirs solaires directs sont les séchoirs à armoire et les séchoirs à serres. Au contraire, les séchoirs solaires indirects placent les matériaux dans une chambre de séchage opaque et augmentent leur température en utilisant de l'air chauffé au lieu du rayonnement (Singh *et al.*, 2018). Ce type de séchoir est utilisé de préférence sur les fruits périssables dont le contenu nutritionnel et les changements de couleur sont susceptibles de se produire avec l'exposition au soleil, et sur les fruits plus gros car ils peuvent atteindre une température de fonctionnement plus élevée que les séchoirs solaires directs (Ekechukwu & Norton, 1999). Comparés à d'autres modèles de sécheurs, les sécheurs indirects sont meilleurs

lorsqu'il s'agit de résoudre les équations d'équilibre énergétique, ce qui les rend plus souhaitables en termes de performance thermique (Mustayen *et al.*, 2014). Un autre type de séchoir solaire est le séchoir en mode mixte, qui combine l'action directe du rayonnement solaire sur la surface des produits et le chauffage solaire indirect sur l'air de séchage.

Outre les séchoirs actifs et passifs, un troisième type de séchoirs, les séchoirs hybrides, sont de plus en plus étudiés de nos jours en raison de leur vitesse de séchage plus rapide (Sharma *et al.*, 2009). Ce type de séchoir utilise non seulement la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique, mais aussi d'autres formes d'énergie pour compléter la chaleur solaire. Certains des systèmes de chauffage d'appoint couramment utilisés sont les combustibles fossiles, la biomasse et les systèmes photovoltaïques thermiques. Le séchage solaire est meilleur que le séchage naturel au soleil pour les qualités sensorielles des produits séchés (Gallali *et al.*, 2000) Dans leur étude, la supériorité du séchage solaire par rapport au séchage naturel est démontrée en termes de réduction plus rapide de la teneur en humidité, de réduction de la teneur en cendres, d'acidité accrue et de meilleure acceptation sensorielle. Dans une autre étude sur des échantillons de raisins et d'abricots, les produits séchés à l'énergie solaire présentent de bonnes propriétés sensorielles et une meilleure acceptabilité que les échantillons séchés par d'autres méthodes de séchage testées (Desa *et al.*, 2019). En conclusion, le séchage solaire peut répondre aux quatre principales exigences en matière de séchage des aliments : temps d'opération court, efficacité du séchage, coût d'opération et qualité des produits séchés. (Desa *et al.*, 2019).

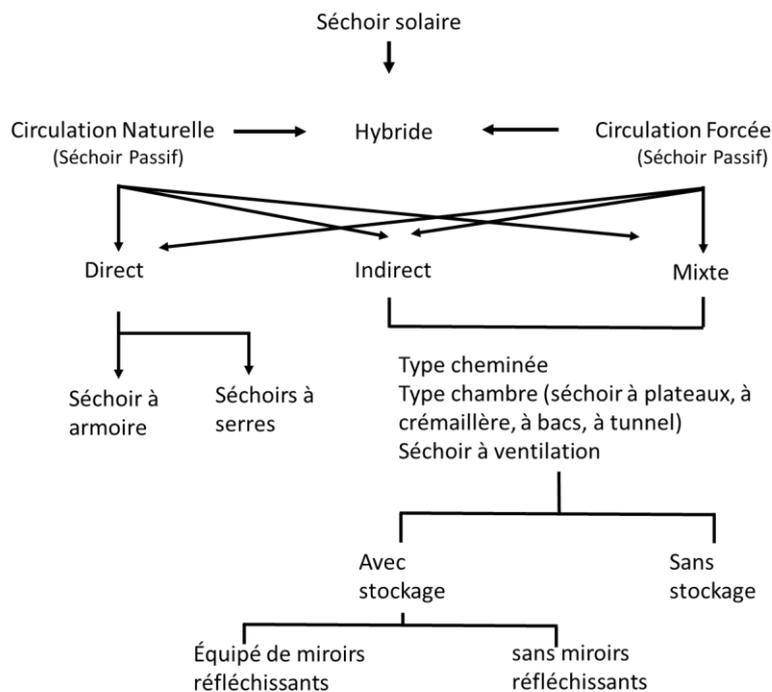


Figure 17. Classification des séchoirs solaires (Fudholi et al., 2010).

4. Quelques techniques modernes de séchage

4.1. Séchage par micro-ondes

Les micro-ondes génèrent un réchauffement volumétrique rapide du matériau en modifiant le champ électromagnétique pour interagir principalement avec les molécules d'eau et les ions dans les matériaux alimentaires (Datta, 2001). L'avantage du chauffage rapide par micro-ondes est reconnu pour de nombreuses applications telles que le chauffage (Sakia *et al.*, 2005), la décongélation (Taher et Farid, 2001), le blanchiment, la pasteurisation et la stérilisation (Wang *et al.*, 2003) et le séchage (Goksu *et al.*, 2005). Pour le séchage, la technique des micro-ondes a été utilisée pour déshydrater les fraises congelées (Piotrowski *et al.*, 2004), banane, carotte et pomme de terre (Krokida et Maroulis 1998). Les micro-ondes influencent la structure, la porosité optique, la viscosité, et l'élasticité du produit séché. La technologie a également été signalé comme étant capable de réduire les dommages de couleur. La configuration de l'équipement est un aspect important pour assurer une bonne répartition et homogénéisation de la chaleur.

4.2. Séchage intermittent

Le séchage intermittent a été considéré comme l'un des procédés de séchage les plus éconergétiques (Chua *et al.*, 2002 ; Chua & Chou 2003 ; Kowalski et Pawłowski, 2010). Le séchage intermittent est une méthode de séchage où les conditions changent avec le temps. Elle peut être obtenue en faisant varier la température de l'air de séchage, l'humidité, la pression ou même le mode d'apport de chaleur. Compte tenu de l'éventail des variations possibles des paramètres, y compris le temps de cycle, un modèle mathématique est nécessaire pour développer des paramètres de séchage optimaux pour le séchage intermittent (Kowalski et Pawłowski, 2010).

4.3. Séchage par pompe à chaleur

Le séchage assisté par pompe à chaleur est particulièrement intéressant pour les espèces sensibles à la chaleur puisqu'ils peuvent être séchés à des taux raisonnables sans dépasser leur température d'endommagement lors de l'utilisation d'air déshumidifié. Le haut coefficient de performance des pompes à chaleur contribue également à améliorer l'efficacité énergétique de ces sécheurs. Cette technique présente certains avantages en raison des conditions d'hygiène, d'un contrôle efficace de l'humidité relative et d'une efficacité élevée. La quantité d'oxygène dans l'air de séchage est limitée grâce à l'utilisation d'une circulation d'air en boucle fermée. Par conséquent, les conditions de brunissement du produit pendant le processus de séchage sont limitées. Le séchage par pompe à chaleur de la pulpe *Calocarpum sapota* pour produire de la poudre a été signalé comme étant plus rapide que le séchage à l'air chaud. Le séchage par pompe à chaleur de tranches de nectarine australienne a montré que le produit séché était meilleur que celui des séchoirs en armoire et en tunnel pour conserver les lactones et les terpénoïdes (Sunthonvit *et al.*, 2007).

4.4. Séchage à la vapeur surchauffée

Le principe de séchage à la vapeur surchauffée consiste au transfert de la chaleur par la vapeur surchauffée au produit à sécher. Pendant tout le processus, la vapeur reste au-dessus de sa température de condensation. En équilibrant la quantité de vapeur surchauffée par rapport aux taux de séchage, il est possible de maintenir la vapeur surchauffée après contact avec le produit. Ainsi, la condensation sur le produit est évitée,

sauf pendant la première phase du processus de séchage, lorsque le produit entre en contact avec le froid. La vapeur surchauffée agit donc à la fois comme source de chaleur et comme agent de séchage pour éliminer l'eau évaporée. Avec le séchage à la vapeur, la majeure partie de la vapeur surchauffée doit être recirculée et réchauffée. La vapeur excédentaire de ce procédé, correspondant à la quantité d'eau évaporée, peut être utilisée comme source de chaleur ailleurs dans le procédé, rendant ainsi possible une récupération d'énergie efficace à une température relativement élevée (Tatemoto *et al.*, 2007) (Figure 18).

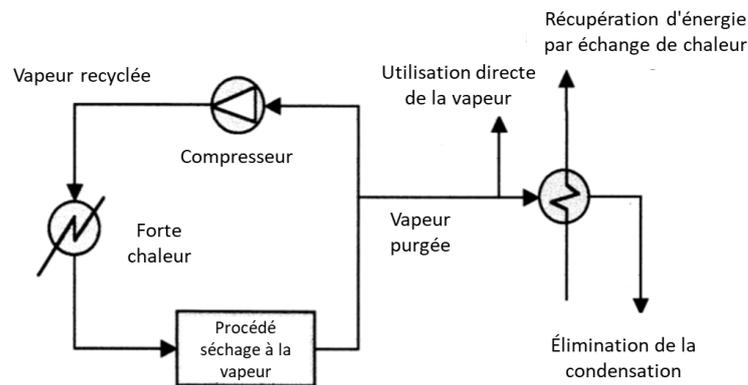


Figure 18. Schéma principal du procédé de séchage à la vapeur surchauffée (Tatemoto *et al.*, 2007).

4.5. Séchage par détente instantanée contrôlée (DIC)

Connu sous le nom « Swell-drying », la DIC est définie comme un couplage du séchage par air chaud et une texturation par détente instantanée. La DIC permet de traiter une large gamme de produits, malgré leur éventuelle fragilité thermique, et améliore considérablement la vitesse de séchage et la qualité du produit (Mounir *et al.*, 2012). Il a été rapporté que le produit fini de ce processus possède des teneurs en vitamines supérieures aux produits séchés classiquement, sans pour autant atteindre le niveau d'un produit lyophilisé. En effet, la DIC permet une préservation de la couleur, une disponibilité des flavonoïdes (Belarbi-Ouarkoub *et al.*, 2008 ; Mounir *et al.*, 2012), et une activité antioxydante (Alonzo-Macías *et al.*, 2013) élevées. En plus, cette technique assure, à travers une décontamination microbiologique partielle et une complète désinsectisation, une augmentation de la durée de vie des produits (Allaf *et al.*, 2012).

5. Interaction eau-matière : étude thermodynamique

L'étude fondamentale des opérations de séchage implique inévitablement une analyse de l'interaction eau-matière aux deux plans distincts thermodynamique et cinétique, impliquant nécessairement la définition des phénomènes et processus fondamentaux. L'analyse thermodynamique est généralement réalisée indépendamment de l'implication du temps ; il s'agit des états d'équilibre issu des transformations du 1er ordre (changement de phase de l'eau, liaisons eau-matière solide et activité de l'eau...) liées principalement aux seuls niveaux des paramètres thermodynamiques tels que la température, la pression, etc. Les opérations pseudo-statiques telles que la transition vitreuse sont qualifiées de « transformations de 2ème ordre » puisqu'elles dépendent également de la vitesse de modification des paramètres thermodynamiques (Albitar, 2010).

5.1. L'activité de l'eau dans le séchage

L'eau contenue dans les aliments se présente sous différentes formes en fonction des interactions qui existent entre les composants des molécules d'eau et des aliments (Arroyo-García *et al.*, 2006). Le concept d'activité de l'eau (a_w) provient d'une série de considérations thermodynamiques qui impliquent l'expression mathématique du potentiel chimique, qui constitue la tendance d'un composant à échapper au système pour empêcher tout échange d'eau entre les matériaux et l'air. Il peut également être défini comme le rapport de la pression de vapeur d'eau dans le système (aliments) et de la pression de vapeur d'eau pure à une valeur constante de pression et de température. Une autre définition possible est l'humidité relative d'équilibre de l'air entourant les aliments à la même température (Sahin et Sumnu, 2006), et elle peut être exprimée comme décrit dans l'équation suivante :

$$a_w = \frac{P_{pv}}{P_{ps}} = \frac{HR}{100}$$

Avec :

P_{pv} : Pression de vapeur d'eau à la surface du produit,

P_{ps} : Pression de vapeur d'eau dans l'air saturé.

HR : Humidité relative de l'air ambiant

Ainsi, l'activité de l'eau des aliments est égale à l'humidité relative de l'air ambiant divisée par 100, ce qui signifie qu'un équilibre a été atteint (Sahin et Sumnu, 2006). L'activité de l'eau est, fondamentalement, comprise entre 0 et 1 ; elle est d'autant plus faible que les forces de liaisons sont intenses et tend au contraire vers l'unité lorsque l'eau se rapproche de l'état libre. L'étude de cette propriété des aliments permet de prévoir leurs détériorations physico-biochimiques et microbiennes. L'activité de l'eau apparaît ainsi comme le principal paramètre critique qui agit directement sur la conservation multidimensionnelle des aliments. L'influence de l'activité de l'eau sur la conservation des qualités des produits alimentaires et plantes aromatiques et médicinales peut être résumée de la façon suivante (figure 19) :

- les microorganismes ne se développent qu'exceptionnellement pour $a_w > 0,8$;
- la plupart des enzymes sont inactives pour $a_w < 0,8$;
- les réactions de Maillard (brunissement non enzymatique des sucres réducteurs en présence de groupements aminés libres) présentent un maximum pour $a_w \sim 0,6$ à $0,7$;
- l'oxydation des lipides est stimulée à des très bas niveaux d'activité de l'eau.

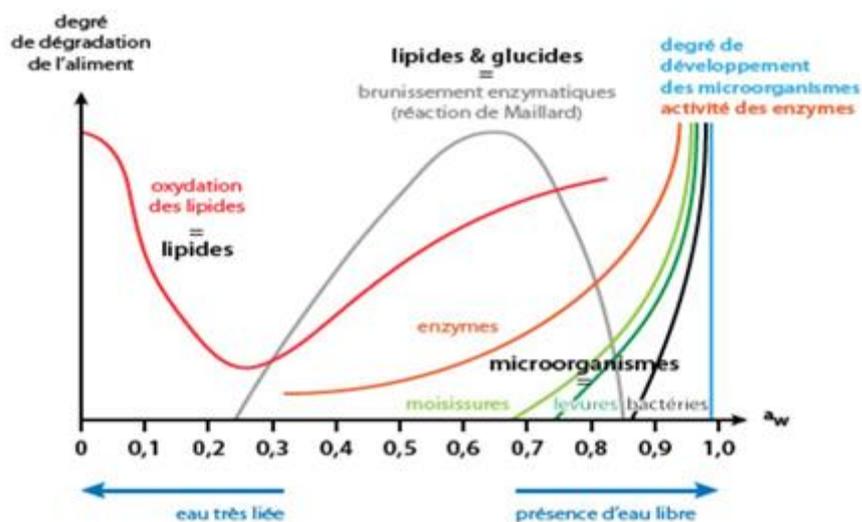


Figure 19. Principales réactions de dégradations des aliments en fonction de l' a_w , (Cheftel et Cheftel, 1977)

5.2. Etude des isothermes de sorption

L'isotherme de sorption alimentaire décrit la relation thermodynamique entre l'activité de l'eau et l'équilibre de l'humidité d'un produit alimentaire à température et pression constantes (Al-Muhtaseb *et al.*, 2004). La compréhension des isothermes de sorption sont très importantes en science et technologie alimentaire pour la conception et l'optimisation de l'équipement de séchage, la conception des emballages, les prévisions de la qualité, la stabilité, la durée de conservation et le calcul des changements d'humidité pendant le stockage (Arroyo-García *et al.*, 2006). La forme typique d'un isotherme reflète la façon dont l'eau est liée au niveau de l'aliment. Des interactions moléculaires de l'eau plus faibles génèrent une plus grande activité de l'eau, ce qui rend le produit plus instable. L'activité de l'eau dépend de la composition, de la température et de l'état physique des composés (Fabra *et al.*, 2009).

Les isothermes de sorption peuvent être générés à partir d'un processus d'adsorption ou de désorption ; la différence entre ces courbes est définie par l'hystérésis, comme le montre la figure 20. L'adsorption de l'eau par les produits alimentaires est un processus dans lequel les molécules d'eau se mélangent progressivement et de façon réversible aux solides alimentaires par chimisorption, adsorption physique et condensation multicouche. Un isotherme peut être typiquement divisé en trois régions ; l'eau dans la région 'A' représente de l'eau fortement liée, et l'enthalpie de vaporisation est considérablement plus élevée que celle de l'eau pure. L'eau liée comprend l'eau de structure et l'eau monocouche, qui est absorbée par les groupes hydrophiles et polaires des composants alimentaires (polysaccharides, protéines, etc.). L'eau liée est non congelable et n'est pas disponible pour des réactions chimiques ou comme plastifiant. Dans la région 'B', les molécules d'eau se lient moins fermement que dans la première zone, elles sont généralement présentes dans les petits capillaires. L'enthalpie de vaporisation est légèrement supérieure à celle de l'eau pure. Cette classe d'eau constitutive peut être considérée comme la transition continue de l'eau liée à l'eau libre. Les propriétés de l'eau dans la région 'C' sont semblables à celles de l'eau libre qui se trouve dans les vides, les grands capillaires, les crevasses ; et l'eau dans cette région se lie librement aux matériaux alimentaires (Santos *et al.*, 2018). De plus, l'hystérésis est liée à la nature et à l'état des composants des aliments, reflétant leur potentiel de réarrangements structuraux et conformationnels, ce qui altère l'accessibilité des sites

polaires énergétiquement favorables. La présence de capillaires dans les aliments entraîne une diminution considérable de l'activité de l'eau. L'explication de l'apparition de l'hystérésis de sorption d'humidité comprend la théorie plusieurs théories, dont la condensation capillaire (Raji *et al.*, 2011).

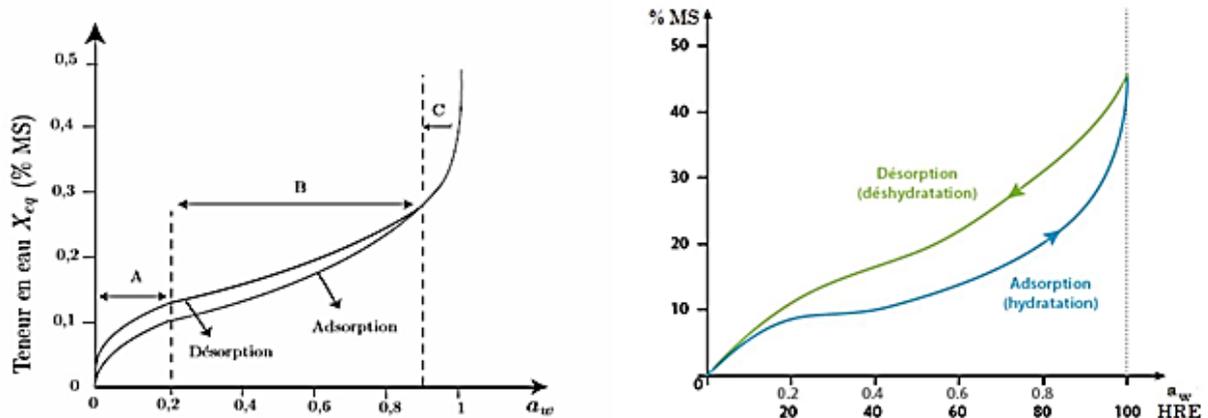


Figure 20. Sections principales de l'isotherme de sorption de type II. (Santos *et al.*, 2018).

5.3. Classification des isothermes de sorption

Brunauer *et al.* (1938) ont classé les isothermes de sorption en fonction de leur forme et de leur processus, établissant cinq types différents, comme le montre la figure 21. Type 1 : Isothermes de Langmuir et/ou similaires qui présentent une augmentation caractéristique de l'activité de l'eau liée à l'augmentation de la teneur en eau ; la première dérivée de cette courbe augmente avec la teneur en eau et les courbes sont convexes vers le haut. Ce type d'isotherme de sorption est typiquement applicable dans le processus de remplissage de la couche mono-moléculaire de l'eau à la surface interne d'un matériau. Type 2 : isothermes de sorption sigmoïdaux, dans lesquels les courbes sont concaves vers le haut ; il prend en compte l'existence de multicouches à la surface interne d'un matériau. Type 3 : connu sous le nom d'isotherme Flory-Huggins, il représente un solvant ou un plastifiant tel que le glycérol au-dessus de la température de transition vitreuse. Type 4 : il décrit l'adsorption d'un solide hydrophile gonflable jusqu'à ce qu'un maximum d'hydratation du site soit atteint. Type 5 : l'isotherme d'adsorption multicouche Brunauer-Emmett-Teller (BET), c'est celui observé dans l'adsorption de la vapeur d'eau

sur charbon de bois et il est lié aux isothermes de type 2 et 3. Les isothermes de type VI sont caractéristiques des adsorbants non poreux à surface homogène. Les deux isothermes les plus fréquemment retrouvés dans les produits alimentaires sont les types 2 et 4 (Blahovec et Yanniotis, 2009).

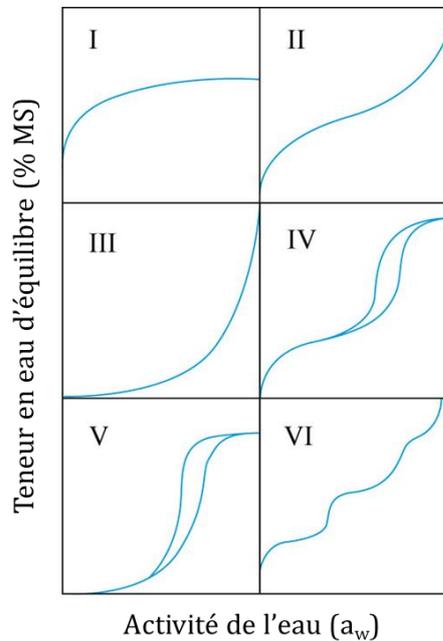


Figure 21. Types d'isothermes décrits par Brunauer (Mathlouthi & Rogé, 2003).

5.4. Modélisation mathématique de séchage et des isothermes de sorption

Au fil du temps, les modèles ont été développés pour étudier la relation entre l'activité de l'eau des aliments et leur teneur en humidité et pour également comprendre le comportement des aliments lors des échanges thermiques. Cette modélisation vise aussi la prédiction de ces réactions pour d'optimiser le processus de séchage. Il est donc important de comprendre l'idée de base de la modélisation de la cinétique de séchage. Les modèles des isothermes de sorption et de séchage sont donc importants pour décider des conditions idéales pour la déshydratation, qui sont des paramètres importants en termes de conception, d'optimisation et d'amélioration de la qualité des équipements (Giri et Prasad 2007). Plusieurs modèles mathématiques ont été proposés pour décrire ces phénomènes. Certains d'entre eux ont été développés sur une base théorique, tandis que d'autres sont simplement empiriques ou une simplification de modèles plus élaborés (Blahovec et Yanniotis, 2009 ; Santos *et al.*, 2018).

Partie II. Matériels et Méthodes

Chapitre I. Criblage morpho-agronomique et physico-biochimique d'une collection ex-situ de 135 cultivars de figier (*Ficus carica* L.)

I. Matériel végétal

Dans ce travail 135 génotypes dont 94 clones locaux et 41 variétés introduites ont été étudiés en pleine maturité (figure 22) pendant la période juillet-octobre en 2017 (tableau 4). Les figes sont considérées comme complètement mûres lorsque les trois quarts du réceptacle présentent une coloration rouge-violette et facilement séparées du rameau. L'ensemble forme une collection conduite en ex-situ à la station expérimentale d'Ain-Taoujdate relevant de l'INRA Meknès (figure 23). Ladite collection, âgée de 14 ans, est plantée selon un dispositif complètement aléatoire à raison de trois arbres par cultivar, et des écartements de 5x3 m. Les arbres sont conduits en gobelet et irriguées quotidiennement au goutte à goutte de Mars à Octobre avec une dose journalière moyenne de 55 litres/arbre. Le sol est argilo-limoneux, moyennement calcaire avec une valeur de 3.04% de CaCO₃ et riche en matière organique avec une moyenne de 2.51% en surface.



Figure 22. Photos de figes fraîches en pleine maturité. A droite la variété "Col de Dame Blanche" et à gauche la variété "Sarilop"



Figure 23. Carte montrant la localisation du domaine expérimental à Ain Taoujdate – Meknès marqué par un triangle rouge par rapport à la ville de Beni-mellal.

II. Paramètres de caractérisation morpho-agronomique et physicochimique

La caractérisation pomologique adoptée (tableau 5) a été effectuée suivant les descripteurs de l'IPGRI (International Plant Genetic Resources Institute). Quinze répétitions par échantillon ont été considérées. La couleur de l'épiderme des figes est obtenue à partir de deux points situés sur les côtés opposés de la région équatoriale du fruit à l'aide d'un colorimètre NH310 étalonné à l'aide d'une plaque blanche et noire (Shenzhen 3NH Technology, Chine). La moyenne des deux mesures a été considérée comme une seule réplique. L'analyse chromatique a été réalisée selon le système de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) de 1976. Les solides solubles totaux ont été déterminés à l'aide d'un réfractomètre numérique (Atago Inc., Japon) et exprimés en degré brix (°Brix). L'acidité titrable, exprimée en % d'acide citrique, est déterminée par titrage du jus de figue avec 0,1 M NaOH. Quinze répétitions par échantillon ont été considérées pour ces mesures.

Tableau 4. Liste des clones locaux de figues et des variétés étrangères incluses dans l'étude

	ABGAITI 2111	Sebti_PS10	ABIAROUS 3015
Clones locaux	AHRA 2870	Mssari_PS13	Beida
	AICHA MOUSSA 2208	Ghoudan_PS1	Bellone
	AMELLAL	Zerqui_PS5	Bougie
	ASSEL 2890	Ghani_PS2	Brebe Blanca
	BENA T1	ElQuoti Lbied_PS3	BREVAL BLANCA 2736
	BENA T2	Ghoudan_PS4	Marron Turkey
	BIOUDI 2218	ElQuoti Lbied_PS6	BURJASOT BLANCA 3037
	BIOUDI 2878	Nabout_PS7	Cello Doma blanca
	BIOUDIE 2255	Arguil_PS8	Colle de dame blanc
	BOUSBATI 2880	Lamtal_PS9	Cello Doma blanca_A3
	Btitarbi	ELQuoti Lbied_PS11	Conadria (Porquert)
	Chaari 2881	Ounq Hmam_PS14	Conidria
	CHAARI 2881	Nabout_PS12	CUELLO DAMA BLANCA 2233
	Chabaa ou rgoud	Chaari_PS15	Diamna
	El Ghani	Jaadi_PS16	Dottato Perguerolles
	EL HMIRI 2224	Ghoudan_PS17	Figue de Marseille
	EL KHAL 2283	Tabli_PS18	Grise St. Jean
	EL QOTI LEZREQ 2883	Tabli_PS19	GROSSE DAME BLANCHE 2953
	EMBAR EL KHAL 2247	ELQuoti Lbied_PS20	Gulgium
	EMBAR LEBIED 2240	INRA 1301	Herida
	Fassi	INRA 1302	III 31 Roger
	FASSI 2267	INRA 1303	IX2 Saritope
	FILALIA 2211	INRA 1304	KHELEMA 3148
	HAFER EL BRHEL	INRA 1305	Kodata
	HAFER JMEL 2253	INRA 1306	MELISSOSYKI 3074
	Hamra	INRA 1308	Napolitana blanca
	HAMRA 2252	INRA 1314	Nardine
	HAMRA 2588	INRA 1502	Palmare_2
	HMIDI 2250	INRA 1503	Palmares
	KAHOULTA 2251	INRA 1506	Pingo de Mel
	Lamandar noir	INRA 1606	Princesse
	Lmandar bied	INRA 2101	Rey Blanche
	MENDAR 2891	INRA 2103	ROYAL BLANCK
	NABOUT 2893	INRA 2105	Snowden
	NOUKALI 2254	INRA 2201	Sucre vert
	NOUKALI 2254	INRA 2201	Sucre vert_2
	Noukalli	INRA 2204	Tena
RHOUDANE 2227	INRA 2205	Trojana	
TARANIMT 2399	INRA 2206	VCR 153/17	
V12	INRA 2304	VII 1 Roger 3	
V2 (b)	INRA 2305	Violette d'Agenteruil	
V33(b)	INRA 2307	White Adriatic_103	
Zerouali	INRA 2307	White Adriatic_13	
Ztaniti	INRA 2401		
INRA 2508	INRA 2404		
INRA 2603	INRA 2501		
INRA 2802	INRA 2506		

Variétés étrangères

Tableau 5. Liste des descripteurs qualitatifs et quantitatifs de l'IPGRI et des coordonnées colorimétriques inclus dans l'analyse morphologique des échantillons de figues prélevés.

Descripteurs de l'IPGRI	Forme du fruit (7.4.1)
	Forme du fruit selon l'emplacement de la largeur maximale (7.4.2)
	Forme de l'apex du fruit (7.4.3)
	Volume de fruits (mesuré par déplacement d'eau) (7.4.5)
	Largeur (7.4.5) et longueur (7.4.7) des fruits
	Longueur du col du fruit (7.4.8) & largeur (7.4.8a)
	Uniformité des fruits (7.4.9) et symétrie des fruits (7.4.10)
	Largeur de l'ostiole (7.4.11)
	Couleur de la goutte de liquide à l'ostiole (7.4.13)
	Couleur Ostiole (7.4.14)
	Longueur (7.4.16) et largeur (7.4.16) du pédoncule du fruit
	Abscission de la tige du rameau (7.4.18)
	Facilité de pelage (7.4.19) et côtes de fruits (7.4.20)
	Fissures de l'épiderme des fruits (7.4.21)
	Épaisseur de la peau des fruits (7.4.23)
	Couleur de l'épiderme des fruits (taches irrégulières) (7.4.27)
	Quantité (7.4.28), couleur (7.4.29), calibre (7.4.30), abondance des lentilles
	Formation de la couleur dans la chair (7.4.31)
	Couleur interne de la pulpe (7.4.32), texture (7.4.34) et jus (7.4.35)
	Cavité fruitière (7.4.36)
Autres descripteurs	Abondance et taille des graines
	Solides solubles totaux (TSS)
	Acidité titrable (AT)
	Indice de maturité = TSS/AT
Coordonnées de couleurs selon CIE**	L* = clarté de la couleur
	a* = Variation de la couleur du rouge au vert
	b* = Variation de la couleur jaune au bleu
	c* = intensité de la couleur, calculé comme : $c = (a^2 + b^2)^{1/2}$
	$h^\circ = \text{angle de teinte (Hue}^\circ\text{), calculé selon la formule } h^\circ = \tan^{-1}(b/a)$

Les chiffres entre parenthèses renvoient aux numéros du descripteur donné par l'IPGRI.

** Commission internationale de l'éclairage (CIE)

III. Paramètres de caractérisation biochimique

1. Préparation des extraits

Les fruits ont été récoltés pendant l'été 2017 au stade plein maturité. Les solides solubles totaux et l'acidité titrable ont été systématiquement mesurés sur des fruits frais en triple exemplaire. Les fruits entiers ont été coupés et congelés à -20°C puis lyophilisés et broyés à température ambiante à l'aide d'un broyeur IKA A11 (St. Louis, MO, USA).

L'extraction des polyphénols avait pour base, la méthode mise au point par Sanders, Mc Michael et Hendrix (2000) et modifiée par Xie et Xie et Bolling (2014). En effet, 1g d'aliquote (poudre homogène) est homogénéisé dans 20ml d'éthanol et de l'eau (80 :20, v/v) à 4°C pendant 5 minutes en utilisant un vortex. L'homogénat est ensuite centrifugé à 3000 g pendant 10 min à 4°C et le surnageant est séparé du culot. Ce dernier est réextrait et homogénéisé et le surnageant est récupéré comme auparavant, pour un total de trois extractions. Les surnageants sont ensuite combinés. L'ensemble des extraits est filtré à travers des filtres Whatman No.1.

2. Polyphénols totaux (PT)

La teneur en PT des extraits de figues a été déterminée par la méthode micro Folin-Ciocalteu (Waterhouse, 2002). Le mélange réactionnel est formé 40 µl d'extrait, 3160 µl d'eau ultrapure, 200 µl du réactif Folin-Ciocalteu et 600 µl de solution de carbonate de sodium à 20%. Après 30 minutes d'incubation à 40°C, l'absorbance a été mesurée à 765 nm (UV-1700 Shimadzu, Japon). La teneur en PT est exprimée en équivalent d'acide gallique par matière sèche (mg GAE/g MS).

3. Flavonoïdes totaux (FT)

La teneur totale en flavonoïdes est déterminée selon la méthode décrite par Jia *et al.* (1999) et modifiée par Barreira *et al.* (2008). En effet 250µl d'extrait est mélangé avec 1,25 ml d'eau distillée et 75µL de nitrite de sodium (NaNO₂) à 5%. Après 5 min, 150µL de chlorure d'aluminium (AlCl₃) à 10% sont ajoutés. Après 6 min, sont ajoutés au milieu 500µl de NaOH 1M et 275µL d'eau distillée. La solution obtenue est bien mélangée et l'intensité de la couleur rose est mesurée à 510 nm contre un témoin. La catéchine est

utilisée pour tracer la courbe d'étalonnage et les résultats sont exprimés en mg d'équivalent (+)-catéchine par matière sèche (mg CE/ 100 g MS) (Barreira *et al.*, 2008).

4. Anthocyanes totaux (AT)

La teneur en AT a été quantifiée selon la méthode différentielle du pH (Cheng et Bren 1991). L'absorbance a été mesurée à 520 et 700 nm dans des tampons à pH 1,0 et pH 4,5 où $A = (A_{520} - A_{700})_{\text{pH } 1,0} - (A_{520} - A_{700})_{\text{pH } 4,5}$. Les résultats ont été exprimés en équivalents g de cyanidine-3-rutinoside (coefficient d'extinction molaire de 28,800 et masse molaire de 595,2) par g de poids sec de fruit (Solomon *et al.*, 2006) selon l'équation suivante :

$$\text{CAT (composition en anthocyanine)} = (\text{Abs} \times \text{PM} \times \text{FD} \times 100 / \text{CAM})$$

Où ;

Abs : absorbance qui est égale à $(\text{Abs}_{510} - \text{Abs}_{700})_{\text{pH } 1,0} - (\text{Abs}_{510} - \text{Abs}_{700})_{\text{pH } 4,5}$; PM : Poids moléculaire (449,2) ; FD : Facteur de dilution (rapport du volume total du mélange réactionnel au volume de l'extrait) ; CAM : Coefficient d'absorption molaire de Cyanidine-3-rutinoside (28800).

5. Sucres solubles totaux

Ils ont été estimés par colorimétrie à l'aide de la méthode à l'acide phénolique sulfurique de Dubois *et al.* (1956) avec une solution de glucose comme étalon. Les solutions et étalons ont été mesurés à 490 nm. Les résultats ont été exprimé en g/100 g MS.

6. Proanthocyanidines totales (PAT)

La teneur totale en PAT a été déterminée par hydrolyse d'acide et formation de couleur (Porter *et al.*, 1985). 50 mg de l'extrait ont été dissous dans 25 ml d'eau distillée. A 2 ml de cette solution, 20 ml de solution de sulfate de fer (77 mg de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dans 500 ml de HCl : n-butanol 2:3) ont été ajoutés. Le mélange a été incubé pendant 15 minutes au maximum à 95°C. Pour un échantillon de contrôle, 2 ml d'eau distillée ont été utilisés. Après incubation, l'échantillon a été refroidi et analysé en mesurant l'absorbance à 540 nm. Les PAT ont été calculés selon l'équation suivante :

$$\text{TPA (g / L)} = (A \times \text{MW} \times \text{FD}) / (\epsilon \times l) \quad (1)$$

Où ;

A = indique l'absorbance de l'extrait ; **MW** = poids moléculaire de cyanidine (287 g / mol) ; **DF** = facteur de dilution (rapport du volume total du mélange réactionnel au volume de l'extrait) ; **ϵ** coefficient d'extinction molaire de la cyanidine (34700 L / (mol.cm)) ; **l** = longueur du trajet en cm (1cm).

Les PAT dans les extraits ont été exprimés sur un poids sec du fruit (mg /100 g MS) et les données ont été exprimées selon une moyenne de trois mesures \pm écart-type.

7. Activité antioxydante (AA)

Elle a été évaluée à l'aide de différents tests répartis en deux groupes de base selon la méthodologie utilisée : (i) l'activité de piégeage des radicaux libres testée par les tests DPPH et ABTS et (ii) l'inhibition des radicaux peroxydes résultant de l'oxydation de l'acide linoléique par le test de blanchiment du Beta-carotène/acid linoléique.

Ces tests ont été entrepris comme suit :

7.1. Essai au phényl-1-picrylhydrazyl (DPPH)

Le dosage du phényl-1-picrylhydrazyl (DPPH) a été effectué selon la méthode adaptée de Kumar *et al.* (2016) avec une légère modification. En résumé, à 0,2 ml de l'extrait ont été ajoutés 3,8 ml de la solution DPPH (solution éthanolique de 0,026 mg.ml⁻¹). Après 30 minutes d'incubation, l'absorbance a été lue à 515 nm et la capacité antioxydante calculée selon l'équation (1).

$$I (\%) = [(Contrôle Abs - \text{échantillon Abs}) / Contrôle Abs] * 100 \quad (1)$$

7.2. Essai au 2,2'-azino-bis (acide 3-éthyl-benzothiazoline-6-sulfonique) (ABTS)

Le test d'ABTS a été réalisé par réaction d'une solution aqueuse de 7 mM ABTS (3,6 g-L⁻¹) avec du persulfate de potassium à 2,45 mM (0,662 g-L⁻¹), suivi d'une incubation du mélange à l'obscurité pendant 12-16 h à température ambiante. La solution ABTS•+ a ensuite été diluée avec de l'éthanol pour obtenir une absorbance de 0,7 \pm 0,02 à 734 nm. Ensuite, 20 μ L de l'extrait ou de l'eau distillée (témoin) ont été mélangés avec 1 mL de la

solution ABTS+ diluée. Après 6 min à 30 °C, l'absorbance a été mesurée à 734 nm. Les valeurs de la capacité antioxydante ont été calculées à l'aide de l'équation (1).

7.3. Oxydation couplée du bêta-carotène et d'acide linoléique

L'essai de blanchiment du β -carotène a été effectué tel que décrit par Tepe *et al.* (2006). Des aliquotes de 2,5 mL d'émulsion β -carotène/acide linoléique ont été mélangées à 0,5 mL des extraits. Après 2h d'incubation à 50 °C, l'absorbance a été mesurée à 470 nm, au moment initial et après 120 min d'incubation à 50 °C pour la réaction d'oxydation. L'inhibition a été exprimée par le pourcentage d'inhibition de la dégradation du β -carotène par rapport au témoin après 120 min d'incubation, en utilisant l'équation (2) rapportée par Freire *et al.* (2017).

$$(Eq.2) \% AA = \left[\frac{(A_{bi} - A_{bf}) - (A_{ei} - A_{ef})}{(A_{bi} - A_{bf})} \right] \times 100$$

Où,

A_{bi} est l'absorbance initiale du blanc, A_{bf} l'absorbance finale du blanc, A_{ei} l'absorbance initiale de l'échantillon, et A_{ef} l'absorbance finale de l'échantillon.

L'activité antioxydante de chacun des tests précédemment décrits, est exprimée en millimoles d'équivalent de Trolox par 100 g de la matière sèche (mM Trolox eq/100g MS) à l'aide de l'équation (3).

$$(Eq.3) \text{ mmol TE} = \frac{((I\%_{\text{sample}} - b)/a)(\text{mg/mL}) * 10^3}{C_{\text{sample}}(\text{mg/mL}) * M_{\text{trolox}}(\text{g/mol})}$$

Où,

Abs : Absorbance ; "a" et "b" forment respectivement, la pente et la constante, de la régression linéaire correspondant à la courbe standard de chaque test ;

M_{trolox} : Masse molaire de Trolox ;

C_{sample} : Concentration de l'échantillon.

Le Trolox a été choisi en raison de sa forte valeur du coefficient de détermination (R^2) révélé pour les trois tests de l'activité antiradicalaire. La figure 24 met en évidence les coefficients des courbes standards du Trolox et de l'acide ascorbique pour le cas du test d'inhibition de la peroxydation de l'acide linoléique.

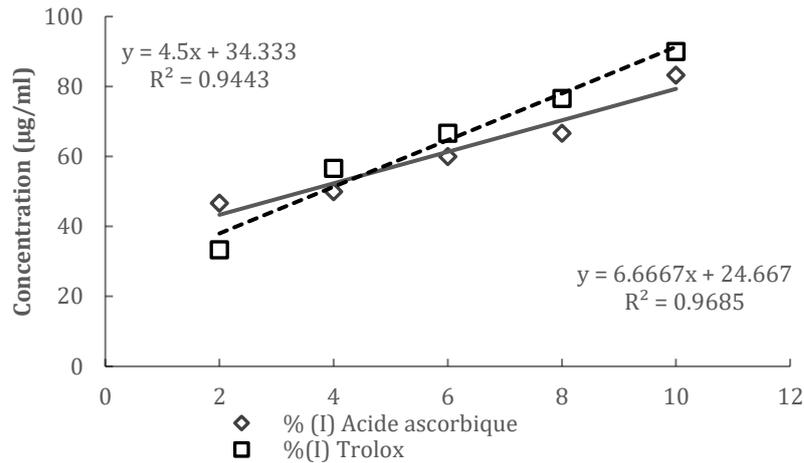


Figure 24. Courbe de régression linéaire de l'acide ascorbique et Trolox pour le test de blanchiment du β -carotène

7.4. Concentration maximale à 50% des radicaux libres (IC50)

La concentration IC50 a été calculée à partir de la régression linéaire du graphe représentant le pourcentage d'inhibition (en X) en fonction des concentrations des extraits (en Y) (10-200 μ L). Pour chaque échantillon, les mesures ont été réalisées en triplicat. Le coefficient de détermination (R^2) résultant des graphes avoisine en moyenne 0.91.

IV. Combinaison des résultats de criblage morpho-agronomique, physicochimique et biochimique

Les données ont été standardisées ($\mu=0$ and $\sigma=1$), et une analyse canonique a été accomplie pour évaluer les corrélations entre les données morpho-agronomiques et biochimiques. Celle-ci est une méthode d'analyse multidimensionnelle qui présente des analogies à la fois avec l'analyse en composantes principales (ACP) et avec la régression linéaire. L'objectif de la méthode est d'explorer les relations pouvant exister entre deux groupes de variables quantitatives observées sur le même ensemble d'individus, afin d'expliquer un groupe par l'autre, ou juste de décrire les ressemblances entre ces deux groupes de variables. Dans cette analyse, les variantes sont calculées à partir des deux ensembles de variables. Une variante canonique est semblable à un facteur dans une analyse en composantes principales.

Les fonctions principales, les variantes et leurs coefficients de corrélation ainsi que les statistiques de la force du modèle seront présentés dans un seul tableau synthétique où, vu le nombre important de variables étudiées (53 variables), seulement celles révélées les plus discriminantes seront rapportées. Dans un deuxième tableau les variantes principales et leurs contributions dans la variance totale sont présentées. Ces données sont d'une grande importance pour une présentation spatiale des cultivars selon le modèle adopté dans ce cas. Toutefois, afin de maximiser la variance totale, une analyse hiérarchique descendante est établie, et sera la base de la sélection des cultivars représentatifs de la collection.

1. Analyse par spectroscopie ATR-FTIR

Réflectance totale atténuée (ATR)

Spectroscopie infrarouge par transformées de Fourier (FTIR)

1.1. Préparation de l'échantillon

Des fruits préalablement épluchés ont été tranchés puis congelés à -80 °C pendant 48 heures avant leur lyophilisation (CHRIST ALPHA 1-2 LDplus). Les épidermes et les pulpes de chaque génotype ont été broyés à température ambiante et soumis à l'analyse par spectroscopie infrarouge selon trois répétitions.

1.2. Spectroscopie FTIR

Les mesures par spectroscopie FTIR ont été effectuées avec un spectrophotomètre Perkin-Elmer LS 55 de l'ordre de 4000-450 cm^{-1} avec une résolution spectrale de 4 cm^{-1} . Pour chaque échantillon (100 mg), une moyenne de trois balayages a été retenue. Avant les mesures, un spectre de fond (correspondant à un spectre infrarouge de la surface de cristal de germanium vide) est soustrait automatiquement des spectres des échantillons. La cellule cristalline est nettoyée après chaque mesure à l'aide de l'éthanol technique et séchée avec du papier absorbant.

1.3. Traitement des spectres infrarouges

Une procédure de correction de base a d'abord été réalisée sur chaque spectre afin de corriger les interférences multiplicatives (Shen *et al.*, 2018). Ensuite, Ces spectres ont

été corrigés par réflectance totale atténuée (Attenuated total reflection (ATR)) en utilisant le logiciel Essential FTIR (version 3.50.183). Les paramètres de ce traitement se résument comme suit : angle d'incidence = 45° ; nombre de réflexion ATR = 1 ; indice de réfraction moyen de l'échantillon = 1,5 ; interaction maximale = 50 ; surface cristalline = 1,8 mm. Le spectre corrigé et l'absorbance des pics majeurs ont été tracés à l'aide du logiciel OriginPro v 8 (OriginLab Corporation Inc.) afin de montrer les différences d'absorbance entre les deux parties du fruit. Les pics dans chaque spectre indiquent sur des régions de vibrations correspondant aux empreintes biochimiques de l'échantillon dont les aires ont été calculées à l'aide du logiciel Essential FTIR. L'ACP a été réalisée sur la base des surfaces intégrées des pics, séparément pour les épiluches et la pulpe afin de déterminer le niveau de discrimination entre les parties du fruit.

2. Analyse des profils des polyphénols, des sucres et des acides organiques

1.4. Extraction des composés phénoliques

Des échantillons de figes (1 g) ont été mélangés à 10 mL de méthanol : eau (80 : 20, v/v), puis mis dans un bain ultrason et macérés au réfrigérateur (4 °C) respectivement pendant 30 et 60 min. Les échantillons ont été ensuite centrifugés pendant 10 min à 8000 g à 4 °C. Les surnageants ont été recueillis et les culots mélangés avec 10 mL d'acétone : eau (70 : 30, v/v) et les mêmes étapes ont été répétées trois fois (sonication, macération et centrifugation). Les surnageants ont été combinés et évaporés à sec à l'aide d'un évaporateur rotatif R-205 sous pression réduite, à 40 °C. Cinq millilitres du méthanol ont été ajoutés au résidu, et le mélange a été bien agité dans un Vortex pendant 2 min. Les échantillons filtrés à travers un Sep-Pak (c-18) pour éliminer les sucres, ont été entreposés à -20 °C jusqu'à leur utilisation ultérieure.

1.5. Analyse des composés phénoliques par HPLC-DAD

Les profils polyphénoliques ont été déterminés par chromatographie liquide haute performance selon la méthodologie décrite par Genskowsky *et al.* (2016). Des échantillons (20 µL) ont été injectés dans un instrument HPLC Hewlett-Packard série 1200 (Woldbronn, Allemagne) équipé d'un détecteur à réseau de diodes UV-vis (UV-vis Diode Array Detecto « DAD »). La séparation des composés phénoliques a été réalisée sur une colonne C18 Teknokroma (Mediterranea sea18, 25 × 0,4 cm, taille des particules de 5

m. Teknokroma, Barcelone, Espagne) et les chromatogrammes ont été enregistrés à 280, 320, 360 ou 520 nm. Les composés phénoliques ont été analysés au niveau des solutions étalons et les filtrats des épidermes et pulpes, selon une élution par gradient de 1 mL.min⁻¹. Le programme de gradient a commencé avec 95 % A, 75 % A à 20 min, 50 % A à 40 min, 20 % A à 50 min et 20 % A à 60 min. La phase mobile était composée d'acide formique : eau (1 : 99, v/v) (A) et d'acétonitrile comme solvant B. L'analyse quantitative des composants a été réalisée par référence à des étalons authentiques qui sont : acide gallique, (+)-catéchine, (-)-épicatéchine, acide chlorogénique, quercétin-3-O-rutinoside, quercétin-3-O-glucoside, luteolin-7-O-glucoside, quercétine, apigénine, cyanidin-3,5-diglucoside, cyanidin-3-O-rutinoside, pelargonidin-3-O-rutinoside (Extrasynthese, Genay, France). L'identification des composés a été réalisée en comparant les spectres d'absorption UV et les temps de rétention de chaque composé avec ceux d'étalons purs injectés dans les mêmes conditions. Les composés ont été quantifiés par des courbes d'étalonnage des étalons en moyenne de trois répliques. Les étalons ont été dissous dans du méthanol à différentes concentrations entre 1 et 250 µg mL⁻¹. Une linéarité élevée ($r^2 > 0,995$) a été atteinte pour chaque courbe standard et pour chaque composé. Cette méthode a été signalée comme étant sensible, reproductible, précise et adéquate pour les analyses de routine des composés phénoliques dans les aliments (Vinha *et al.*, 2002).

1.6. Profils des sucres et des acides organiques

Les profils des acides organiques et des sucres ont été quantifiés selon López-Hernández *et al.* (2016). Brièvement, 0,5 g de chaque échantillon lyophilisé a été soumis à une extraction par ultra-sonification pendant 30 min avec 5 ml d'eau Milli-Q, à une centrifugation à 15 000 g pendant 20 min (Sigma 3-18 K ; Sigma, Osterode am Harz, Allemagne). Ensuite, un millilitre de l'extrait centrifugé hydrophile a été filtré ($\Phi = 0,45$ µm), et 10 µL ont été injectés dans un HPLC Hewlett-Packard série 1100 (Wilmington DE, USA) avec distributeur automatique et détecteur UV, réglé à 210 nm et couplé à un autre détecteur d'indice de réfraction (HP 1100, G1362A). Une colonne (Supelcogel TM C-610H 30 cm x 7,8 mm) et une pré-colonne (Supelguard 5 cm x 4,6 mm ; Supelco, Bellefonte, PA) ont été utilisées pour l'analyse des acides organiques et des sucres. Le tampon d'élution était constitué de 0,1 % de phosphore à un débit de 0,5 mL min⁻¹, et l'absorbance des acides organiques a été mesurée à 210 nm à l'aide d'un détecteur à barrettes de diodes (DAD). Les mêmes conditions de HPLC (tampon d'élution, débit et colonne) ont été

utilisées pour l'analyse des sucres et leur détection a été effectuée à l'aide du détecteur à indice de réfraction. Les étalons d'acides organiques et de sucres ont été obtenus de Sigma (St. Louis, MO). Des courbes d'étalonnage ont été utilisées pour la quantification des acides organiques et des sucres présentant une bonne linéarité ($R^2 \geq 0,999$). Les résultats ont été exprimés en g.kg^{-1} de la matière sèche.

V. Analyse statistique des données

Comme différentes mesures ont été utilisées, les données ont été normalisées ($\mu=0$ et $\sigma=1$) pour rendre les caractères comparables. Le logiciel SPSS v22 a été utilisé et les résultats obtenus ont été exprimés en moyenne \pm écart-type. L'analyse de la variance a été effectuée pour vérifier les différences significatives entre les échantillons prélevés. L'analyse multiple de Duncan (DMRT) a servi pour comparer les moyennes des échantillons à un niveau de $p < 0,05$. Les coefficients de corrélation et leurs niveaux de signification ont été calculés à l'aide du modèle de Pearson. Une analyse MANOVA a été réalisée pour mettre en évidence l'effet variétal à un niveau de $p < 0.05$. L'analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée selon les coefficients de corrélation et de la méthode de rotation Varimax avec normalisation de Kaizer, afin de déterminer les variables les plus discriminantes et l'inertie totale exprimée par le modèle. Une matrice de distance générée à partir des données a été utilisée pour l'analyse du dendrogramme relaté par la distance euclidienne pour mieux comprendre les niveaux de similarité entre les accessions moyennant le logiciel de statistiques R Studio v1.1.4.

Chapitre II. Valorisation post-récolte des figes : cinétique des isothermes, modélisation de séchage et étude biochimique de l'huile des graines

I. Cinétique et modélisation des isothermes de sorption

1. Procédure expérimentale

Des figes fraîches des variétés 'Kadota' et 'Sarilop' de taille et de couleur uniformes ont été récoltées à leur pleine maturité en août 2019. Leur humidité a été déterminée à 30, 40 et 50 °C par gravimétrie statique. Les fruits ont été ainsi lavés et coupés en petits morceaux de 2 g et 0,6 ($\pm 0,0001$ g) pour les soumettre à la désorption et l'adsorption, respectivement. Ils ont été placés sur un porte-échantillon à l'intérieur de pots hermétiques en verre (figure 25), où six solutions salines saturées (KOH, MgCl₂, K₂CO₃, NaNO₃, KCl et BaCl₂) étaient utilisées (Greenspan, 1977 ; Bizot *et al.*, 1987). Ces solutions ont une gamme d'activité de l'eau de 5 à 90% et maintiennent l'humidité relative à l'intérieur des bouches (tableau 6). Les échantillons ont été pesés tous les 3 jours jusqu'à l'équilibre (valeur constante enregistrée sur deux pondérations consécutives). Afin de minimiser le degré de sorption de l'humidité atmosphérique pendant la pesée des échantillons, chacune a été accomplie en moins de 30 s. Chaque expérience a été répétée trois fois. Environ 8 à 10 jours ont été nécessaires pour atteindre l'équilibre hygrométrique pour la désorption et l'adsorption, respectivement. La teneur en humidité de chaque échantillon a été déterminée à l'aide d'un étuvage à 105 °C ($\pm 0,1$ °C).

Tableau 6. Valeurs standards de l'activité de l'eau des sels utilisés en fonction de la température (Bizot *et al.*, 1978)

	KOH	MgCl ₂ .6H ₂ O	K ₂ CO ₃	NaNO ₃	KCl	BaCl ₂ .2H ₂ O
30°C	0,0738	0,3238	0,4317	0,7275	0,8362	0,898
40°C	0,0626	0,3159	0,423	0,71	0,8232	0,891
50°C	0,0572	0,3054	0,4091	0,6904	0,812	0,8823

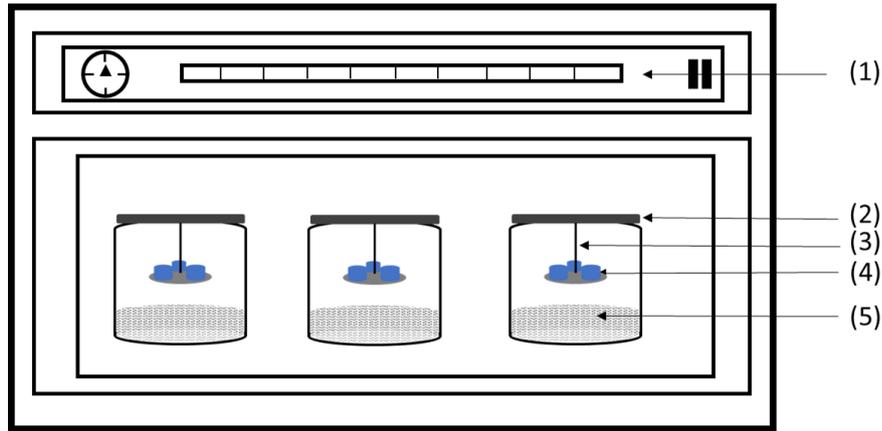


Figure 25. Equipement expérimental pour la détermination des isothermes de sorption : (1) bain thermostaté ; (2) pot hermétique ; (3) porte-échantillon ; (4) échantillon ; (5) solution saline saturée

2. Analyse des données et modélisation

Une analyse de régression non linéaire a été réalisée avec les logiciels Curve Expert 3.1 et Originlab pro 8.1 pour estimer les constantes des modèles à partir des isothermes de sorption. Les modèles des isothermes GAB, Enderby et Peleg les plus utilisées, ont été retenus pour ajuster les données expérimentales (tableau 7). La teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) et l'activité de l'eau (a_w) ont été calculées pour ajuster les données expérimentales en utilisant les modèles de sorption de Brunauer-Emmett-Teller (Brunauer *et al.*, 1938) (Eq. 1) et Halsey (Halsey, 1948) (Eq. 2).

$$X_{eq} = \frac{X_m C a_w}{(1-a_w)(1+(C-1)a_w)} \quad (1)$$

$$X_{eq} = \left(\frac{-A}{T \ln a_w} \right)^{\left(\frac{1}{B} \right)} \quad (2)$$

Où,

T est la température en kelvin (K) et X_m (teneur en humidité monocouche (kg d'eau (kg de base sèche)⁻¹) et C (constante caractéristique de l'interaction entre l'adsorbat et l'adsorbant) sont des paramètres spécifiques de l'équation BET, tandis que A et B sont spécifiques de l'équation de Halsey.

Les paramètres des modèles sélectionnés ont été déterminés par régression non linéaire à l'aide d'OriginLab. Le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur standard de

l'humidité estimée (SE) (Eq.3) ont été utilisés pour déterminer la précision de chaque modèle.

$$SE = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{df} \quad (3)$$

Où MR_{exp} est le $i^{ème}$ taux d'humidité d'équilibre, Mi_{pre} est le $i^{ème}$ taux d'humidité d'équilibre prédite, N est le nombre d'observations, et df est le degré de liberté du modèle de régression.

3. Détermination des conditions optimales de conservation

L'étude des isothermes de sorption permet de définir l'humidité optimale d'équilibre pour la conservation des figes sèches, ainsi que la teneur en eau d'équilibre à atteindre en fin de séchage. Les données expérimentales sont rassemblées sur un même graphique permettant de modéliser l'isotherme de sorption par une fonction du 3^{ème} degré. Ce procédé de calcul consiste à faire une décomposition polynomiale de la teneur en eau d'équilibre X_{eq} en fonction de l'activité de l'eau. Ceci permet de déterminer la valeur pour laquelle la dérivée seconde de X_{eq} s'annule (point d'inflexion) et par la suite, l'humidité relative optimale pour la conservation.

4. Analyses thermodynamiques

L'enthalpie différentielle, habituellement appelée chaleur isostérique de sorption Q_{st} (kJ mol^{-1}), est définie comme la somme de la chaleur isostérique nette d'adsorption (q_{st}) et de la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau pure à la température du système (H_v) (Tolaba *et al.*, 2004) (Eq.4).

$$Q_s = q_s + H_v \quad (4)$$

La chaleur isostérique nette de la sorption à une humidité constante (X_{eq}) peut être calculée à partir des données expérimentales des isothermes de sorption en utilisant l'équation de Clausius-Clapeyron (Kaur *et al.*, 2006) (Eq.5).

$$q_{st} = -R \left[\frac{d(\ln(a_w))}{d(1/\theta)} \right]_{X_{eq}} \quad (5)$$

Où,

a_w est l'activité de l'eau, θ la température absolue (K), et R ($8,314 \cdot 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) la constante des gaz parfaits.

En supposant que la chaleur isostérique nette de sorption est indépendante de la température, l'Eq.5 peut être intégrée pour donner Eq.6 :

$$\ln(a_w) = \frac{-q_{st}}{R} \frac{1}{T} + \frac{\Delta S}{R} \quad (6)$$

Où,

ΔS est l'entropie différentielle de sorption (J/kmol).

La chaleur isostérique nette de sorption q_{st} a été déterminée à partir de la pente de la courbe $\ln(a_w) = f\left(\frac{1}{T}\right)$. La pente déduite $\frac{q_{st}}{R}$ et la constante de $\frac{\Delta S}{R}$ suivent une relation linéaire.

L'énergie libre spécifique de Gibbs est calculée sur la base de l'équation (7).

$$\Delta G = RT \ln(a_w) \quad (7)$$

La théorie de la compensation de l'enthalpie-entropie propose une relation linéaire entre q_{st} et ΔS (Leffer et Grunwald 1963) (Eq. 8).

$$q_{st} = T\beta + \Delta S + \Delta G\beta \quad (8)$$

Où,

la température isocinétique $T\beta$, est la température à laquelle toutes les réactions de sorption se déroulent à la même vitesse. L'énergie gratuite ($\Delta G\beta$) aide à déterminer la spontanéité de la sorption. Celle-ci est spontanée si $\Delta G\beta$ est négative ($-\Delta G\beta$) et inversement si $\Delta G\beta$ est positive ($\pm \Delta G\beta$).

Krug *et al.* (1976) ont recommandé de tester la théorie de la compensation en comparant la température isocinétique par rapport à la température moyenne harmonique, T_{hm} , qui peut être définie comme expliqué par l'équation 10.

$$T_{hm} = \frac{n}{\sum_1^n \left(\frac{1}{T}\right)} \quad (10)$$

Où,

n est le nombre d'isothermes.

La théorie de compensation ne peut être appliquée que si la température isocinétique ($T\beta$) est différente de la température moyenne harmonique T_{hm} . Le processus est piloté par enthalpie lorsque $T\beta > T_{hm}$, tandis qu'il est contrôlé par entropie dans l'état opposé.

Les propriétés thermodynamiques peuvent être calculées à une pression d'étalement donnée, qui représente la force exercée par un gaz adsorbé sur une surface solide (Skaar et Babiak, 1982). Elle peut être considérée comme la force à la surface qui doit être exercée perpendiculairement à chaque longueur unitaire de la bordure pour empêcher la surface de s'étendre (Smith *et al.*, 2001). La pression d'étalement et la pression de vapeur ont des propriétés similaires, mais thermodynamiquement non équivalentes (Babbitt, 1942). La pression d'épandage ne pouvant être mesurée expérimentalement, est estimée à l'aide d'une méthode analytique décrite par Fasina *et al.* (1999).

$$\pi = \frac{K_B T}{A_m} \int_0^{a_w} \frac{\theta}{a_w} da_w \quad (11)$$

Où,

k_B est la constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$), A_m la surface d'eau ($1.06 \times 10^{-19} \text{ m}^2$), θ le taux d'humidité exprimé comme $\theta = \frac{x_{eq}}{x_m}$ et T est la température (en Kelvin).

En utilisant le modèle GAB, par substitution de θ/a_w et l'intégration d'Eq. 11, on obtient la pression de diffusion de l'eau adsorbée Eq.12 :

$$\pi = \frac{K_B T}{A_m} \ln \left[\frac{1 - B a_w + C a_w}{1 - C a_w} \right] \quad (12)$$

Où,

B et C sont les constantes du modèle GAB.

La surface spécifique est importante pour déterminer les propriétés de liaison de l'eau des matériaux particuliers. Les valeurs de la surface de l'eau, exprimées en $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ de solide, peuvent être déduites de l'équation 13, en utilisant les valeurs d'humidité de monocouche (Cassini *et al.*, 2006).

$$S_0 = M_m \times \frac{1}{P_{MH_2O}} \times N_0 \times A_{H_2O} = 3.5 \times 10^3 \times M_m \quad (13)$$

Où,

S_0 est la surface spécifique (ou Aire de la monocouche) ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$), M_m la teneur en humidité de la monocouche, PM_{H_2O} le poids moléculaire de l'eau (18 g mol^{-1}), N_0 le nombre de molécules d'Avogadro (6×10^{23} molécules par mole) et A_{H_2O} la surface des molécules d'eau ($10,6 \times 10^{-20} \text{ m}^2$).

Tableau 7. Modèles isothermes de sorption de l'humidité utilisés pour analyser les données des cultivars du figuier.

Modèles	Expression mathématique	Références
GAB	$X_{eq} = \frac{ABC a_w}{[1 - Ba_w][1 - Ba_w - BCa_w]}$	Maroulis <i>et al.</i> (1988)
Enderby	$X_{eq} = \left[\frac{A}{(1 - Ba_w)} + \frac{C}{(1 - Da_w)} \right] a_w$	Kammoun <i>et al.</i> (2012)
Peleg	$X_{eq} = A(a_w)^C + B(a_w)^D$	Popovski et Mitrevski (2004)

II. Modélisation du séchage solaire en couche mince

1. Expériences de séchage

Les figues ont été coupées en tranches fines de taille uniforme ($\sim 6 \text{ mm}$) et de masse constante (70 g). L'expérience a été réalisée selon un plan combinant trois niveaux de température de l'air de 60, 70 et 80 °C et deux niveaux de vitesse 150 et 300 m^3/h . Le séchoir a été mis en marche environ 40 minutes avant chaque essai pour obtenir les conditions requises de séchage. Les tranches de figues ont été réparties uniformément sur la première grille en acier inoxydable (mailles de 10 x 10 mm) pour assurer une diffusion homogène. L'air chauffé passe à travers les grilles depuis le fond du séchoir vers le haut pour évacuer l'humidité des échantillons. Le chauffage auxiliaire servait à contrôler et à maintenir constante la température de l'air de séchage.

Le temps de pesée $M_h(t)$ est de 15 à 30 s. Dans un premier temps, $M_h(t)$ est prise toutes les 5 min pour la première heure, puis toutes les 10 min pour la deuxième heure et finalement 20 min jusqu'à l'obtention de l'équilibre. Le poids sec de ces tranches (M_s) quant à lui, a été déterminé à la fin de chaque expérience en maintenant les échantillons à 105 °C pendant 24 h.

La teneur en eau a été déterminée en utilisant l'équation (1). La température et l'humidité de l'air à l'entrée du séchoir ont été mesurées de la même cadence que la pesée à l'aide d'un hygromètre thermique HI 9564 (Hanna Instruments Ltd, Bedfordshire, Royaume-Uni).

$$M(t) = \frac{M_h(t) - M_s}{M_s} \quad (1)$$

2. Dispositif expérimental

Les tranches de figues ont été déshydratées dans un séchoir solaire à convection forcée indirecte (figure 26) fonctionnant à 80% par le rayonnement solaire. Le séchoir a été développé par le laboratoire de l'École Normale Supérieure (ENS) de Marrakech. Le prototype est un système sans stockage et avec recyclage total ou partiel d'air avec un capteur solaire, un appoint de chauffage électrique, un ventilateur de circulation et une armoire de séchage, comme indiqué dans la figure 26. Le panneau d'air solaire est en tôle noire galvanisée inclinée à 10° de 0,5 mm d'épaisseur à surface orientée vers le sud non sélective aux dimensions de 1 m sur 2,5. La chambre de séchage est de 1,40 m de hauteur, 0,5 m de largeur et 0,90 m de profondeur et comporte 10 casiers. Un ventilateur centrifuge (0,0833 m³/s ; 80 mm CE, 220 V) fournit une vitesse théorique de 1,7 m/s avec un régulateur qui permet de fixer le débit d'air (150 ou 300 m³/h). Le ventilateur de circulation qui fournit de l'air frais, a une puissance de 0,1 kW. Le chauffage d'appoint a une puissance de 4 kW et a été relié à un thermorégulateur pour contrôler la température (0 à 99 ± 0,1 °C). Koukouch *et al.* (2017) ont donné plus de détails sur ce sujet.

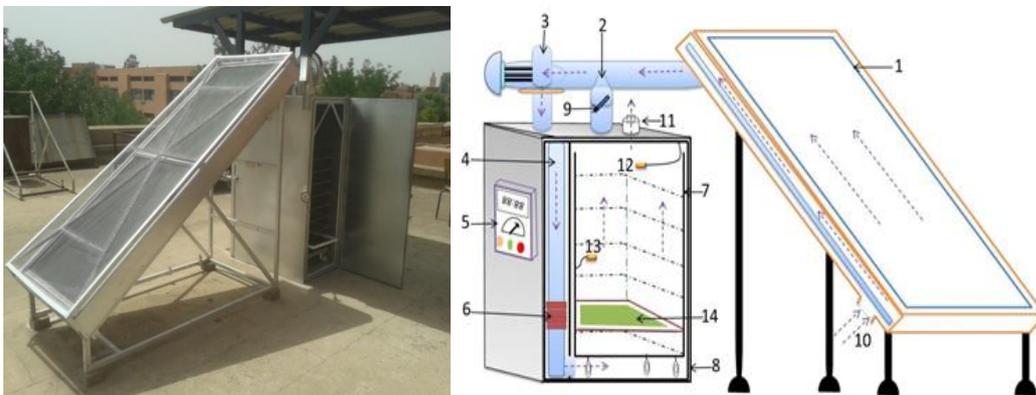


Figure 26. Schéma du séchoir solaire. (1) Capteur solaire, (2) ventilateur de circulation, (3) ventilateur, (4) direction du flux d'air, (5) boîte de contrôle, (6) système de chauffage auxiliaire, (7) étagères, (8) armoire de séchage, (9) recyclage d'air, (10) pied de contrôle, (11) sortie d'air, (12) sonde d'humidité et (13) thermocouple (14) porte échantillon (Ouaabou *et al.*, 2018)

2. Détermination des taux d'humidité et de séchage

La détermination de la teneur en humidité (MR) est cruciale pour l'étude de la progression du séchage. C'est un excellent indicateur de la qualité physico-chimique de l'échantillon. Le MR et le taux de séchage ont été déterminés à l'aide des formules suivantes :

$$MR(t) = \frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

$$f = \frac{\left(-\frac{dM}{dt}\right)_t}{\left(-\frac{dM}{dt}\right)_0} \quad (3)$$

Où,

$M(t)$ est la teneur en eau en fonction du temps (kg d'eau/kg de matière sèche (MS)), M_0 la teneur en eau initiale (kg d'eau/kg MS), M_e la teneur en eau d'équilibre (kg d'eau/kg MS), f taux de séchage, $\left(-\frac{dM}{dt}\right)_0$ taux du séchage initial, (kg eau/(kg matière sèche.min⁻¹)) et $\left(-\frac{dM}{dt}\right)_t$ correspond au taux du séchage final (kg eau/(kg de matière sèche.min⁻¹)).

La détermination de la cinétique du séchage est réalisée à l'aide des logiciels DOS Smoothing, Curve Expert 3.1 et Originlab pro V.8.

3. Diffusion effective de l'humidité

La diffusivité efficace de l'humidité D_{eff} , propriété de transport importante dans la modélisation, indique sur l'écoulement de l'humidité à l'intérieur du produit de séchage. L'humidité migre de l'intérieur du produit et atteint les surfaces extérieures sous l'action de divers mécanismes de transport susceptibles d'être combinés (flux capillaire, diffusion Knudsen, diffusion pure, diffusion de surface, évaporation et condensation). Cette humidité s'évapore ensuite dans l'air par convection (Hui, 2008). La D_{eff} a été calculée en utilisant la deuxième loi de diffusion de Fick (Eq. 4).

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 MR \quad (4)$$

Où,

t est le temps et D_{eff} la diffusivité effective de l'humidité (m².s⁻¹) variant en fonction de la température et de la teneur en humidité.

En supposant que le transport de l'humidité s'effectue par diffusion, que le rétrécissement est négligé, que la distribution initiale d'humidité et de la température est uniforme, l'équation de Fick's peut être alors développée comme indiqué dans l'Eq (5) (Maurer, 2005).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left(-(2n + 1)^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{R^2} \right) \quad (5)$$

Pour une période de séchage suffisamment longue, l'équation ci-dessus devient (Darvishi, 2013) :

$$\ln(MR) = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \quad (6)$$

Où,

L (en m) est la demi-épaisseur des échantillons utilisés.

La diffusivité effective de l'humidité (D_{eff}) déduite de l'Eq. (6), est exprimée en Eq. (7) :

$$D_{eff} = - \frac{B4L^2}{\pi^2} \quad (7)$$

La D_{eff} est calculée à partir de la pente de l'équation (8) en ajustant les données du séchage. E_a , L'énergie minimale requise par ce processus est liée à D_{eff} et sa dépendance à la température est exprimée par le modèle d'Arrhenius (Silva *et al.*, 2010).

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(- \frac{E_a}{RT} \right) \quad (8)$$

Où,

D_0 est le facteur pré-exponentiel de la loi d'Arrhenius ($m^2.s^{-1}$), E_a l'énergie d'activation ($kJ.mol^{-1}$), R la constante du gaz parfait ($8,314 \text{ KJ mol}^{-1}$), et T (K) la température de l'air sec (Erbay et Icier, 2010).

L'énergie d'activation est calculée en traçant $\ln(D_{eff})$ en fonction de l'inverse de la température ($\frac{1}{T}$).

4. Ajustement des courbes de séchage

Pour décrire la cinétique de séchage en couche mince et prédire le taux d'humidité, 9 modèles empiriques et semi-empiriques ont été testés (tableau 8). Le choix du plus approprié est basé sur les critères suivants :

- coefficient de corrélation (r) le plus élevé ;
- valeur la plus faible du Khi-deux (χ^2).

Ces statistiques sont définies comme suit :

$$r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{eq_{exp,i}} - \overline{MR}_{eq_{exp,i}})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{*eq_{exp,i}} - \overline{MR}_{*eq_{exp,i}})^2}}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N - n}$$

Tableau 8. Modèles mathématiques appliqués aux courbes de séchage de figues

Modèle	Equation	Référence
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Roberts <i>et al.</i> (2008)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Singh <i>et al.</i> (2006) Aghbashlo <i>et al.</i> (2009)
Logarithmique	$MR = a \exp(-kt) + c$	Kingsly <i>et al.</i> (2007)
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Babalís <i>et al.</i> (2006)
Approche de la Diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Wang & Singh (1978)
Midilli-Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Akpınar <i>et al.</i> (2003)
Handerson & Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Akpınar <i>et al.</i> (2006)
Handerson & Pabis Modifié	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Goula <i>et al.</i> (2016)
Two-term	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$	Henderson (1974)
K, n, a, b, c, k ₀ , k ₁ , k ₂ , g, h : constantes des modèles		

5. Détermination de la couleur et de l'activité de l'eau

Les coordonnées de couleur L*, a* et b* ont été déterminées avant et après chaque expérience à l'aide d'un colorimètre NH310 étalonné (Shenzhen 3NH Technology, Chine). La couleur des épidermes a été mesurée à partir de deux points situés sur des côtés opposés du diamètre de la tranche, tandis que la couleur de la pulpe a été déterminée à partir de deux points arbitraires sur les deux côtés de la tranche. La moyenne des deux mesures a été considérée comme une seule réplique. Les différences de couleur dans les

épidermes et les pulpes à l'état sec et frais ont été utilisées pour décrire le changement de la couleur pendant le séchage. Ces différences sont calculées par l'équation (9).

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (9)$$

Où : L^* , a^* , b^* et L_0^* , a_0^* , b_0^* représentent les données chromatiques à l'état frais et sec respectivement.

L'activité de l'eau des tranches fraîches et séchées a été évaluée par un hygromètre électrique étalonné (HygroLab, Rotronic, Bassersdorf, Suisse).

Toutes les mesures ont été réalisées en trois répétitions.

6. Théorie de compensation enthalpie/entropie

L'énergie totale consommée (kWh) par le séchoir solaire a été obtenue en utilisant l'équation 10 (Motevali *et al.*, 2014).

$$E_t = (A \cdot v \cdot \rho_a \cdot C_a \cdot \Delta T \cdot D_t) + E_{mec} \quad (10)$$

Où,

E_t est la consommation totale d'énergie (kWh) du système de séchage, A l'aire du plateau où l'échantillon est placé (m²), v la vitesse de l'air (m/s), ρ_a la densité de l'air (kg/m³), C_a la chaleur spécifique de l'air (kJ/kg °C), ΔT la différence de température (°C), D_t la durée totale du séchage (h) et ρ_a la puissance micro-onde (kW).

La capacité calorifique spécifique de l'air d'entrée (Aghbashlo *et al.*, 2012) et la puissance des micro-ondes (Naghavi *et al.*, 2010) ont été calculées en utilisant les équations (11) et (12) :

$$\rho_a = \frac{101.325}{0.287 \times T} \quad (11)$$

$$C_a = 1.04841 - \frac{3.83719 \times T}{10^4} + \frac{9.45378 \times T^2}{10^7} - \frac{5.49031 \times T^3}{10^{10}} + \frac{7.92981 \times T^4}{10^{14}} \quad (12)$$

E_{mec} est l'énergie mécanique consommée pendant chaque expérience. Elle peut être définie comme l'énergie électrique utilisée par le ventilateur et le chauffage auxiliaire, et a été mesurée par un compteur d'énergie électrique avec une précision de 0,01 kWh.

L'énergie thermique spécifique (kWh/kg) nécessaire pour éliminer 1 kg d'eau de l'échantillon a été calculée en utilisant l'équation 13 (Torki-Harchegani *et al.*, 2016) :

$$SEC = \frac{E_t}{m_w} \quad (13)$$

Où m_w est la masse d'eau prélevée (kg), calculée en utilisant l'équation 14 (Beigi, 2016) :

$$m_w = \frac{W_0(Y_0 - Y_f)}{100 - Y_f} \quad (14)$$

Où,

W_0 est le poids initial de l'échantillon (kg), Y_0 le taux d'humidité initial (% b.s.) au moment ($t=0$) et Y_f le taux d'humidité (% b.s.).

III. Analyse biochimique de l'huile des graines de figue

1. Matériel végétal

1.1. Extraction de graines

Les fruits des variétés "White Adriatic" et "Bourjassote Noir" et des deux clones locaux "C7A14" et "C11A21" ont été récoltés aléatoirement à leur pleine maturité pendant le mois d'Août de 2019. Ils ont été épluchés manuellement et mis dans 10% d'éthanol technique pour moins de 5 min, et le mélange a été agité jusqu'à ce que les graines se séparent de la pulpe par décantation. Les graines ont été lavées abondamment à l'eau distillée, puis séchées à température ambiante pendant 24 heures. Les graines ont une forme ronde et une couleur jaunâtre et un poids moyen de mille graines d'environ $1,14 \pm 0,01$ g. Elles ont été ensuite réduites en une fine poudre à l'aide du broyeur IKA A11 (St. Louis, MO).

2.2. Extraction d'huile

L'huile de graines de figue a été extraite par Soxhlet selon la méthode ISO (1999) 659:199. Ainsi, 20 grammes de chaque poudre ont été mélangés à 150 mL de n-hexane (99 %) en utilisant des cartouches en cellulose (123×43 mm i.d. ; Whatman International, Brentford, Royaume-Uni). Après 4 heures d'extraction, le solvant a été évaporé à 40 °C à

l'aide d'un rotavapeur (Cravotto *et al.*, 2011). Le poids de l'huile a été déterminé selon l'équation suivante en accordance avec Chougui *et al.* (2013) :

$$\text{Poids de l'huile (\%)} = [(M1 - M0)/M2] * 100$$

Où,

M0 est le poids du tube vide (g), *M1* le poids du tube après évaporation (g) et *M2* le poids des graines en poudre (g). Les huiles résultantes ont été stockées étanches dans l'obscurité à 4°C jusqu'à l'analyse.

3. Identification des acides gras par chromatographie gazeuse liquide

Le profil des acides gras a été déterminé conformément à la méthode standard de l'UE (annexes II et IX du règlement (CEE) n° 2568/91 de la Communauté européenne). Les esters méthyliques ont été préparés à froid avec une solution d'hydroxyde de potassium méthanolique et extraits avec du n-heptane. Le profil des acides gras a été déterminé par chromatographie en phase gazeuse liquide (CLG) Varian CP 3380 Chromatograph, équipé d'une colonne capillaire (CP-Wax 52 CB : L=30m ; Φ = 0.25mm ; Ft= 0.20 μ m), et d'un injecteur split-splitless avec distributeur automatique CP-8400 et un détecteur FID. La température de l'injecteur, du détecteur et du four a été maintenue à 220, 230 et 180 °C, respectivement. L'hydrogène a été utilisé comme gaz porteur à une pression interne de 110 kPa. La température du four a été réglée à 70 °C pendant les 4 premières minutes, augmentée à 110 °C à un taux de 8 °C/min, puis à 170 °C à 5 °C/min et maintenue pendant 10 minutes et élevée finalement à 250 °C, à 4 °C/min puis maintenue pendant 15 minutes supplémentaires. Le volume injecté était de 1 μ L avec un rapport de division de 1: 50. Les résultats sont exprimés en pourcentage relatif de chaque acide gras, calculé par normalisation interne de la surface du pic chromatographique. Le mélange étalon de référence d'esters méthyliques d'acides gras (C4-C24, FAME Mix 37) a été utilisé pour l'étalonnage et pour l'identification des acides gras selon leurs temps de rétention.

4. Extraction et dosage des polyphénols totaux

L'extraction des composés phénoliques a été réalisée selon la méthode décrite par Tsimidou *et al.* (1992). Ainsi, deux grammes d'huile ont été dissous dans 10 mL d'hexane, puis ajoutés à 4 mL du méthanol à 60 % (V/V). Le mélange a été soumis à une agitation pendant 2h à température ambiante dans l'obscurité, puis filtré à travers un papier Whatman No.1. Une deuxième extraction a été réalisée dans les mêmes conditions. Les deux filtrats ont été combinés, concentrés sous vide à l'aide d'un rotavapeur et finalement reconstitués dans 10 mL de méthanol pur et stockés à 20 °C.

La teneur en polyphénols totaux a été déterminée selon la méthode colorimétrique du Folin-Ciocalteu décrite par Favati *et al.* (1994). Le mélange réactionnel contient 50 µL d'extrait, 3 ml d'eau ultrapure, 250 µL de réactif Folin-Ciocalteu et 750 µL du carbonate de sodium (7%). Le mélange a été agité pendant 8 minutes à température ambiante, puis 950 µL d'eau ultrapure y ont été ajoutés. Après 1h d'incubation dans l'obscurité, l'absorbance a été mesurée à 760 nm contre un blanc. L'acide gallique a été utilisé comme référence pour la courbe d'étalonnage. L'analyse a été effectuée en triple et les résultats ont été exprimés en équivalent mg d'acide gallique (GAE) pour 100 g d'huile.

5. Activité antioxydante par le test DPPH et ABTS

L'activité antioxydante des huiles a été déterminée selon la méthode DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl) et ABTS^{o+} (acide 3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique) décrites par Brand-Williams *et al.* (1995), et Re *et al.* (1999) respectivement. Tous les tests ont été répétés trois fois.

5.1. Test DPPH

50 µL de chaque extrait d'huile ont été ajoutés à 950 µL de solution méthanolique de DPPH (0,030 mg. mL⁻¹). Le mélange a été incubé à l'obscurité pendant 60 minutes puis l'absorbance a été lue à 515 nm. Le contrôle a été préparé dans les mêmes conditions sans extrait d'huile.

5.2. Test ABTS

10 μ L d'extrait ou d'eau ultrapure (témoin) ont été mélangés à 990 μ L de solution ABTS \bullet + diluée. Après 30 min d'incubation dans l'obscurité, l'absorbance de ce mélange a été mesurée à 734 nm. La solution ABTS \bullet + a été préparée par réaction d'une solution aqueuse de 7 mM ABTS (3,6 g.L⁻¹) avec 2,45 mM de persulfate de potassium (0,662 g.L⁻¹), suivie d'une incubation dans l'obscurité pendant 18 heures à température ambiante. Le méthanol a été utilisé pour diluer la solution mère de ABTS \bullet + jusqu'à ce qu'une absorbance de $0,70 \pm 0,05$ à 734 nm soit atteinte. Les résultats ont été exprimés en mg de Trolox équivalent par gramme d'huile.

5.3. Concentration maximale inhibitrice de 50% des radicaux libres (IC₅₀)

La IC₅₀ (mg d'huile/mL) est la concentration à laquelle 50% des radicaux DPPH \bullet et ABTS \bullet + sont piégés. Elle a été calculée à partir de la présentation graphique des pourcentages d'inhibition par rapport aux dilutions d'extraits des huiles.

6. Analyse dans le proche infrarouge (ATR-FTIR)

Chaque échantillon d'huile a été mesuré trois fois à la température ambiante pour un volume de 100 μ l déposé à l'aide d'une micropipette sur la surface de la bille en cristal, puis réparti uniformément à l'aide de la pointe de la micropipette. La correction et le traitement des spectres recueillis ont été assurés suivant l'approche précédemment décrite.

Partie III. Résultats et discussions

Chapitre. I

Criblage morpho-agronomique et physico-biochimique d'une collection ex-situ de 135 cultivars de figuier (*Ficus carica* L.)

Chapitre I. 1. Évaluation de la diversité génétique de la collection de figuier par les descripteurs morpho-agronomiques et physico-chimiques.

1. Analyse descriptive

Les résultats de la caractérisation morpho-agronomique sont résumés dans les tableaux 9, 10 et 11. Une très large variabilité a été observée au sein des génotypes évalués pour les caractères qualitatifs pomologiques, à l'exception du miellat à l'ostiole, la couleur des lenticelles et la taille des graines. La forme des fruits varie significativement en fonction des génotypes, avec dominance de la forme globulaire (76%). Environ 70% des génotypes ont un fruit symétrique et 55 % ont une forme arrondie à la périphérie du pédoncule. Ce dernier, en général, tend à rester attaché au rameau en période de maturité (Tableau 10). Ces paramètres de forme sont d'une grande importance pour le commerce de la figue, et Condit (1941) et Benettayeb *et al.* (2017), ont indiqué que la forme globulaire est la plus appropriée pour l'emballage et le transport des fruits. A l'encontre de plusieurs concordant avec ces résultats (Ateyyeh, 2006 ; Çalışkan *et al.*, 2008 ; Gozlekci, *et al.*, 2011), d'autres ont rapporté que plutôt la forme oblate est dominante (Özeker *et al.*, 1997 ; Şimşek, 2009 ; Darjazi, 2011).

Généralement, un grand nombre de génotypes ne présente pas de miellat à l'ostiole (65%) pour lequel la couleur rosâtre prédomine (61%) (Tableau 10). La couleur visuelle de l'épiderme a été dominée par le vert-jaune (46 %) et l'abscission facile de la tige a été observée chez la majorité des génotypes. Pour la majorité des cultivars, les figues ont été peu juteuses (74%) et présentaient des stries et des fissures longitudinales sur l'épiderme (81% et 72%, respectivement). La couleur secondaire de l'épiderme est généralement absente dans un grand nombre de génotypes (69%). Quand ce caractère se présente, il se manifeste par des tâches irrégulières souvent jaunes (54%). Les lenticelles, dont l'abondance est rare chez 43% de la population, ont surtout présenté une couleur blanche

(66 %). Les lenticelles, sont d'importantes ouvertures naturelles présentes sur la surface de l'épiderme du fruit (Guan *et al.*, 2018). Leur rôle semble être encore mal compris et sont probablement impliquées dans les échanges d'oxygène, de vapeur d'eau et de composés organiques volatils (Rymbai *et al.*, 2012). La pulpe a été d'une texture moyenne (52 %), de couleur rose (45 %) avec une petite cavité (52%). La quantité de graines est généralement intermédiaire (50%) et présentent une taille moyenne (75%) (Tableau 10).

Pour les traits quantitatifs, des différences hautement significatives ($p < 0,01$) ont été révélées, sauf pour la largeur de l'ostiole (Tableau 11). Le poids du fruit a enregistré un coefficient de variation de 0,4 et une valeur moyenne de $34,41 \pm 14,78$ g. Les géotypes "Lmandar Noir", "Bougie", "Chaaba Ourgoud", "Kadota" et "Brown Turkey" ont eu les plus hautes valeurs qui sont 87,03, 76,95, 73,72, 61,53 et 60,41 g, respectivement. Cependant, les plus faibles ont été enregistrées par les géotypes "INRA 1303", "Ounq Hmam_PS14", "Zerqui_PS5", "Ghoudan_PS1" et "Gulgium", pour lesquels les valeurs ont été comprises entre $12,4 \pm 3,35$ g et $16,4 \pm 2,98$ g (tableau 11). Plusieurs travaux dans différents pays, ont montré une grande variabilité pour ce caractère, oscillant entre 12,3 et 99,4 g en Turquie (Çalışkan et Polat, 2008), 24 et 58 g en Tunisie (Aljane *et al.*, 2008) et entre 30 et 85 g en Slovénie (Podgornik *et al.*, 2010). Outre le facteur génétique, cette variabilité serait probablement liée aux conditions environnementales et les pratiques agricoles (Gozlekci et al., 2011). Le volume de la figue a oscillé entre 10 et 85 cm³ avec une valeur moyenne de $35,17 \pm 14,7$ cm³, pour lequel les géotypes "Bougie" et "Ghoudan 2233" ont enregistré les plus hautes valeurs ($73,3 \pm 6,6$ et $80 \pm 4,6$ cm³, respectivement). Les plus faibles, néanmoins, ont été observées chez "Figue de Marseille" et "Zerqui_PS5" (9,33 et 13 cm³) (Tableau 11).

La Longueur du fruit a varié de 21,34 à 48,83 mm avec une moyenne de $34 \pm 5,89$ mm, alors que la largeur a oscillé entre 25,93 et 61,58 mm et une moyenne de 39,85 mm (Tableau 11). Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Gozlekci et al. (2011), Papadopoulou *et al.* (2002), Ferrara et Papa (2003) et Rodrigues *et al.* (2018). Ces caractères sont généralement influencés par la charge fruitière de l'arbre. Selon Can *et al.* (2001) et Ateyyeh et Sadler (2006), les dimensions du fruit sont très appréciées pour la consommation en frais, et les petits calibres sont généralement destinés à la mise en conserve. Pour les dimensions du pédoncule, des coefficients de variation de 0,5 et 0,25 ont été enregistrés pour la longueur et la largeur, respectivement. En effet, la longueur du

pédoncule a oscillé entre 0,6 et 79,71 mm avec une moyenne de $8,1 \text{ mm} \pm 4,13$, au moment où la largeur l'a été entre 1,05 et 11,94 mm et une moyenne de $4,86 \text{ mm} \pm 1,23$ (Tableau 11). Les extrêmes positifs ont été observés, pour ces derniers caractères, chez les cultivars "Mnedar 289", "Figue de Marseille", "Trojana" et "El Ghani". Des figues à col court ne sont pas souvent appréciées car susceptibles de subir des dégâts lors de la récolte (Ozeker et Isfendiyaroglu, 1998), et les valeurs correspondantes ont oscillé entre 1,64 et 9,52 avec une moyenne de $7,01 \pm 2,16$ mm. La Largeur du col a varié, quant à elle, de 2,22 à 15,7 avec une moyenne de $8,64 \pm 2,62$ mm (Tableau 11).

L'ostiole de la figue, à rôle clé dans le maintien de la spécificité pollinisateur-hôte (Noort et Compton, 1996 ; Jousselin *et al.*, 2003), a eu un diamètre variant de 2,34 à 8,79 mm avec une moyenne de $5,13 \pm 1,14$ mm. Les cultivars "Grosse dame blanche", "INRA 1506" et "Bioudi 2878" ont présenté les ostioles les plus ouverts, dont les valeurs ont été respectivement de 8,79, 7,93, 7,88 mm (Tableau 11). Ces résultats sont semblables à ceux rapportés dans des études antérieures où ce diamètre se situe entre 2,56 et 7,43 mm (Chessa et Nieddu 1990 ; Aksoy *et al.*, 1992 et Aksoy *et al.*, 2003). Les génotypes "Breval Blanca 2736" et "Violette d'Agenteruil" étaient à épidermes très épais avec des valeurs respectives de 8,35 et 7,8 mm. Ce caractère a montré un coefficient de variation de 0,44 et un intervalle de variation entre 1,32 et 8,35. L'épaisseur la plus faible a été observée chez les génotypes "Sebti_PS10" (1,34 mm) et "Gulgium" (1,32 mm) (Tableau 11).

Les génotypes locaux "Ounq Hmam_PS14", "INRA 2307" et "INRA 1303" ont été dotés des plus fortes teneurs en solubles solides totaux (SST), avec les moyennes respectivement de 40,06, 36,46 et 30,33 %. Les plus faibles niveaux ont été enregistrés par les génotypes "Conidria" (9,3%) et "Rhoudane 2223" (11,13%). L'acidité titrable a été élevée chez les génotypes "Dottato Perguerolles", "Kahoulta 2251", "Ghoudan_PS4", avec les valeurs correspondantes de 1,72, 1,66 et 1,64 %. Toutefois, elle a été substantiellement faible chez "Sebti_PS10", "Noukali 2254" et "Conidria", avec des valeurs inférieures à 0,08. Ces résultats concordent avec Gozlekci *et al.* (2011) et Ateyyeh et Sadder (2006) ayant rapporté des valeurs allant de 13 à 29 % et de 0,1 à 0,51 %, respectivement pour SST et l'acidité titrable.

Le rapport STT/l'acidité est un indicateur important de la qualité. Plus il est élevé, plus le fruit est sucré, inversement, le goût est amer (Colaric *et al.*, 2005). Les figues des "Sebti_PS10", "Noukali 2254" et "Chaari_PS15" ont été les plus douces avec des indices de

la maturité respectifs de 219,3, 138,35 et 104,5, alors que les plus acides sont relatifs à "Dottato Perguerolle" (7,85), "V2(b)" (8,81) et "Hafer Bghal" (8,81 \pm 0,41) (Tableau 11). Ces résultats sont en harmonie avec ceux rapportés par Flores (1990) ; Pilando *et al.* (1992) ; Kuden *et al.* (1995) ; Bostan *et al.* (1998) ; Sanchez *et al.* (2003) ; Jayasena & Cameron (2008) ; Çalışkan *et al.* Polat (2012) ; Trad *et al.* (2013) et Jiménez (2016).

Les données chromatiques de l'épiderme ont montré une variabilité beaucoup plus élargie par rapport à l'évaluation visuelle. Ils ont rendu possible de déceler les nuances de couleur variant du jaune vif (valeurs élevées et positives de L* et c*) au noir (valeurs négatives de L* et c*) en passant par des couleurs intermédiaires (vert jaune, marron, violet, bleu-pourpre, etc.). La clarté de l'épiderme (L*: lightness) a varié de 16,71 (épiderme foncé) à 83,64 (épiderme clair). Les génotypes "Palmeras" et "Hamra" ont exprimé des couleurs plus vives et claires (83,64 et 81,52 respectivement), alors que "Bellone" et "Ghoudan_PS1" ont été dotés des plus faibles valeurs de L* (16,71 et 20,43 successivement). La variable c* (Chroma) exprimant la saturation de la couleur, a été forte chez les génotypes à épiderme foncé et ses valeurs ont oscillé de 1,98 à 30. La coordonnée chromatique h° (teinte), couleur réelle de l'épiderme, fluctuait entre 1,24° et 350°. Presque le tiers de la collection présente une valeur h° d'environ 100, niveau représentant la gamme des couleurs vertes-jaunes. Un effectif de 15 % de la population se caractérise par h° situé dans la gamme des bleues (270°) (Tableau 11). Ces résultats sont similaires à plusieurs études antérieures (Rodov *et al.*, 2012 ; Viuda-Martos *et al.*, 2015 ; Sedaghat *et al.* Rahemi, 2018). Toutes ces caractéristiques ont été regroupées dans la figure 27 qui décrit la répartition des génotypes dans l'espace chromatique L*a*b*. Ce modèle, souvent utilisé pour le classement des couleurs, a ressortit deux grands groupes opposés et un petit à couleur intermédiaire tendant vers le vert-brun. Plusieurs études ont souligné l'importance de ces descripteurs pour le criblage où peuvent être révélées des corrélations potentielles entre les coordonnées chromatiques et les composés antioxydants, essentiellement les phénols (anthocanines, tanins, catéchines, etc.) et les caroténoïdes (lycopène, beta-carotène, etc.) (Pissarra *et al.*, 2003 ; Itle et Kabelka, 2009 ; Stinco *et al.*, 2013 ; Kuś *et al.*, 2014).

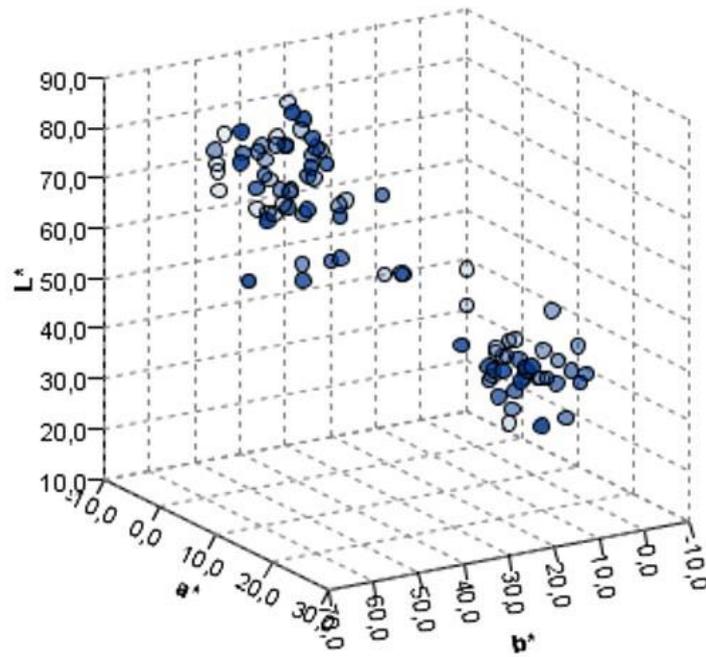


Figure 27. Répartition des génotypes de figuier selon la couleur de l'épiderme présentée dans l'espace chromatique L*a*b* CIE

Tableau 9. Valeurs moyennes de quelques caractères morphologiques, colorimétriques et physicochimiques pour quelques accessions du figuier étudiées

Code string	Poids	Longueur	Longueur pédoncule	Longueur Col	Ostiole Diamètre	Epaisseur épiderme	TSS	L*	c*	h*	Forme du fruit	Abscission du pédoncule	Couleur de l'ostiole	Texture de la chair
Dottato Perguerolles	54,38	40,02	8,51	7,20	4,93	6,34	14,53	73,98	42,27	102,76	Globose	Difficile	Blanc	Fine
Pingo de Mel	41,85	40,98	9,11	7,89	6,16	5,69	19,50	59,53	34,98	96,19	Globose	Facile	Rose	Fine
Rey Blanche	39,73	38,44	12,60	0,00	4,56	2,65	16,87	68,00	47,45	104,87	Globose	Difficile	Blanc	Fine
Marron Turkey	60,42	42,15	8,32	0,00	7,52	5,44	12,40	30,43	5,89	171,93	Globose	Moyenne	Rouge foncé	Grossière
White Adriatic	42,14	37,85	13,05	0,00	5,41	3,48	16,57	54,38	38,95	97,65	Globose	Moyenne	Blanc	Moyenne
IX2 Sarilope	58,94	37,40	5,03	0,00	6,15	4,93	15,07	67,91	52,50	97,78	Globose	Moyenne	Blanc	Fine
III 31 Roger	45,73	33,77	10,29	4,36	4,95	3,89	14,83	67,41	35,96	103,57	Globose	Moyenne	Blanc	Fine
Diamna	48,12	35,81	5,22	6,28	4,66	3,65	16,27	79,91	63,70	89,13	Oblate	Moyenne	Rouge	Moyenne
Grise St. Jean	32,08	31,75	8,67	0,00	4,93	5,83	15,93	50,59	12,73	57,24	Oblongue	Moyenne	Rouge	Moyenne
Palmares	26,50	27,57	5,08	0,00	4,64	3,08	17,57	64,59	46,87	95,58	Globose	Moyenne	Blanc	Moyenne
Tena	34,87	35,81	7,49	0,00	3,93	6,03	16,27	60,86	52,00	95,69	Oblate	Facile	Blanc	Moyenne
Conidria	37,41	35,53	9,83	0,00	3,42	6,57	9,30	74,08	36,44	104,68	Globose	Moyenne	Blanc	Grossière
Princesse	55,84	36,01	10,02	5,77	6,16	4,75	12,63	63,54	41,45	98,01	Oblate	Moyenne	Blanc	Moyenne
Violette d'Agenteruil	43,26	38,30	14,48	0,00	5,67	7,78	12,73	46,73	19,34	55,60	Globose	Moyenne	Marron	Fine
Chabaa ou rgoud	73,72	48,50	5,23	0,00	6,69	4,31	15,56	66,89	34,82	104,46	Globose	Difficile	Blanc	Moyenne
Btitarbi	37,57	36,42	10,78	7,11	5,76	2,85	21,43	29,38	11,85	223,73	Globose	Moyenne	Rose	Moyenne
Zerouali	50,98	38,26	5,06	7,66	6,80	2,87	12,07	34,03	5,63	349,62	Globose	Facile	Marron	Moyenne
El Ghani	34,79	35,22	14,64	9,01	6,06	2,73	17,57	48,69	22,09	88,92	Globose	Moyenne	Marron	Grossière
Lamandar noir	87,03	38,46	4,11	7,27	5,02	5,44	13,10	78,32	45,78	98,40	Globose	Moyenne	Rouge	Moyenne
Bougie	76,95	44,21	7,05	7,14	7,75	5,25	14,60	64,62	36,37	100,15	Globose	Moyenne	Blanc	Moyenne
Chaari 2881	31,82	34,23	7,69	0,00	4,27	2,17	17,73	28,24	9,54	360,90	Globose	Moyenne	Marron	Moyenne
Ztaniti	25,67	29,76	8,21	0,00	4,18	2,09	22,40	40,80	16,31	26,92	Globose	Moyenne	Blanc	Moyenne
Abgati 2111	42,68	37,78	9,67	0,00	5,89	6,23	14,57	38,69	19,91	17,29	Globose	Facile	Rose	Moyenne
Abiarous	18,40	28,45	7,20	0,00	5,76	7,23	23,80	74,29	50,74	100,93	Oblongue	Difficile	Blanc	Fine
Bourjassot blanca	28,25	37,74	9,34	6,39	4,09	2,34	22,90	22,54	3,03	278,18	Oblongue	Moyenne	Rouge foncé	Moyenne
Kadota	61,53	42,94	9,12	9,17	7,69	2,01	18,93	56,12	37,44	106,47	Globose	Moyenne	Blanc	Grossière
Nabout	38,27	34,01	4,07	0,00	4,18	5,91	14,10	64,03	40,04	105,20	Globose	Moyenne	Marron	Fine

Tableau 10. Fréquences dominantes et analyse de la variance des caractéristiques qualitatives des fruits

Descripteur	Critères d'évaluation	Caractère dominant	Fréquence	ANOVA Signification
Forme du fruit	Oblongue - Globose - Oblate	Globuleuse	76%	**
Symétrie du fruit	Ovoïde - Pyriforme	Ovoïde	70%	**
Forme autour du pédoncule	Plate – Arrondie - Aiguë	Arrondi	55%	**
Abscission du pédoncule	Facile - Moyenne- Difficile	Moyenne	60%	**
Couleur de l'ostiole	Blanc - Marron – Rose - Rouge- Rouge-noir	Blanche	51%	**
Miellat à l'ostiole	Absent - Présent	Absent	65%	Ns
Couleur du miellat	Transparent - Rosâtre - Rouge – Rouge noir - Jaune	Rosâtre	61%	**
Couleur de l'épiderme	Noir -Pourpre - Pourpre bleuté - Marron - Marron vert - Vert - Light green – vert jaune - Jaune	Vert-jaune	46%	**
Stries sur l'épiderme	None - Intermédiaire - Abondant	Intermédiaire	81%	**
Facilité d'épluchage	Facile - Moyenne- Difficile	Moyenne	51%	**
Fissures sur l'épiderme	Présent - Longitudinales - Fissures minuscules - Absent	Longitudinale	72%	**
Succulence du fruit	Pâteux - Peu juteux - Juteux - Très juteux	Peu juteux	74%	**
Couleur secondaire	Jaune - Vert - Violet - Autre	Jaune	54%	**
Forme de la couleur secondaire	Absent - Bandes - Patches	Absent	69%	**
Quantité de lenticelle	Absent- rare - Intermédiaire - abondant	Rare	43%	**
Couleur de lenticelles	Blanc - Rose - vert	Blanc	66%	Ns
Dimensions de lenticelles	Petit - Moyenne - Large	Moyenne	80%	*
Couleur de la pulpe	Blanc - Jaune- Amber - Rose - Rouge – rouge noir - Pourpre	Rose	45%	**
Texture de la pulpe	Fine - Moyenne - Grossière	Moyenne	52%	**
Cavité du fruit	None - Petit - Moyenne - Large	Petit	52%	*
Quantité de graines	Rare - Intermédiaire - Abondant	Intermédiaire	50%	**
Taille de graines	Small - Moyenne - Large	Moyenne	78%	Ns

- Significatif à 0.05; ** Significatif à 0.01; NS: non-significatif

Tableau 11. Statistiques descriptives des propriétés pomologiques et colorimétriques des figes

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Coefficient de variation	Carré moyen
Poids (g)	12.40	87.03	36.31	4.784	0.40	1407.5***
Longueur (mm)	21.34	48.83	34.41	5.89	0.17	2421.1***
Largeur (mm)	25.93	61.58	39.85	7.23	0.18	354.3***
Longueur du pédoncule (mm)	2.95	16.30	8.10	4.13	0.51	572.5***
Largeur du pédoncule (mm)	2.92	7.96	4.86	1.23	0.25	95.7***
Longueur du col (mm)	1.64	9.52	7.01	2.16	0.31	11.9***
Largeur du col (mm)	2.22	15.69	8.64	2.62	0.30	17.7***
Diamètre de l'ostiole (mm)	2.34	8.79	5.13	1.14	2.58	43.8 ^{NS}
Épaisseur de l'épiderme (mm)	1.32	8.35	3.74	1.64	0.44	225.2***
Volume (mm)	10.00	85.00	35.17	14.70	0.42	68.6***
Solides solubles totaux (%)	9.30	40.07	19.26	5.41	0.28	8.2***
Acidité titrable (g d'acide citrique/ 100 g de jus)	0.07	1.72	0.76	0.31	0.4	451.6***
pH	2.51	6.6	4.41	0.91	0.20	87.6***
Indice de la maturité	6.28	275.71	34.93	27.33	0.78	2.2***
L*	16.71	83.64	52.36	19.32	0.37	3598.6***
a*	-8.70	24.02	8.78	7.99	0.71	618.9***
b*	-3.03	90.86	24.11	18.87	0.79	3528.2***
c*	1.98	63.70	27.24	15.3	0.56	2282.7***
h*	1.24	360	120.23	25.51	0.88	71985.2***

^{NS}, *** : non significatif et significatif à un niveau de 0,001, respectivement

2. Corrélations entre les variables

Les relations entre les caractères agro-morphologiques, colorimétriques et physico-chimiques étudiés, ont été identifiées par implication de tous les descripteurs dans une corrélation bivariée du modèle de Pearson. Les corrélations les plus significatives à un niveau de 0,05 et de 0,01 sont résumées dans le tableau 12. Le poids des figes et la largeur du pédoncule ont été corrélés positivement ($r = 0,739^{**}$). De même, des corrélations significatives reliant simultanément le poids avec la longueur ($r = 0,348^{**}$) et la largeur ($r = 0,393^{**}$) du col. Il a été de même corrélé au diamètre de l'ostiole ($r = 0,178^*$) et à l'épaisseur de l'épiderme ($r = 0,418^{**}$) (Tableau 12). Les mêmes niveaux de corrélation ont été rapportés par des études antérieures (Mahdavian *et al.*, 2006 ; Gozlekci 2011 ; Darjazi, 2011 ; Gaaliche *et al.*, 2011 ; Aljane *et al.*, 2012 ; Khadivi-Khub et Anjam,

2014 ; Polat *et* Çalışkan, 2017). Il est à noter qu'à l'exception de la longueur du pédoncule et de la largeur de l'ostiole, toutes les dimensions du fruit ont été corrélées positivement au volume de la figue. Par ailleurs, les dimensions du pédoncule et du col ont été inversement corrélées avec la cavité du fruit avec un coefficient de corrélation généralement supérieur à $|0,25|$. En outre, les fruits à épiderme épais semblent être sensibles aux fissures ($r= 0,206^*$) et présentent également une faible acidité titrable ($r= -0,255^{**}$) et des solides solubles totaux ($r= -0,379^{**}$). D'autres corrélations ont également été observées entre les coordonnées de couleur L^* et c^* et les fissures de l'épiderme ($r=-0,307^{**}$ et $r= -0,284^{**}$, respectivement), ce qui pourrait signifier que les fruits à couleur foncée ont tendance à développer plus de fissures.

Ces corrélations sont pour la plupart difficiles à expliquer. Elles nécessitent d'être confirmées par des travaux similaires et étudiées dans leur prépondérance sur ces variables (Dicenta *et* Garcia, 1992 ; Norman *et al.*, 2011).

3. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée pour déterminer les descripteurs exprimant plus la variance totale dans l'ensemble de données. Pour chaque facteur, seule une variance supérieure à $|0,45|$ a été considérée comme significative. Pour ce modèle, une variance totale de 60,26 % est expliquée par dix composantes. Les trois premières sont prédites par 21 variables, ce qui représente plus de la moitié, et correspond à 27,81 % de la variabilité totale (Tableau 13). Cela signifie que ces attributs sont les plus importants dans le criblage des propriétés agro-morphologiques au grand impact sur la discrimination de la collection (Lezzoni *et* Pritts, 1991). La première composante, représentant 12,31 % de la variance totale, est fortement influencée par le poids ($r=0,89^{**}$), la longueur ($r=0,69^{**}$), la largeur ($r=0,85^{**}$), les dimensions du pédoncule ($r=0,72^{**}$, $r=0,6^{**}$ pour la longueur et la largeur, respectivement) et le volume ($r=0,74^{**}$).

Compte tenu de la taille importante de la collection et du nombre élevé des variables, les corrélations entre les composantes principales et les variables sont estimées très fortes et significatives. Ceci indique que la première fonction est déterminée par les traits géométriques du fruit. Principalement influencée par la couleur et les propriétés de l'épiderme du fruit, la deuxième fonction renferme 9,98 % de l'inertie totale. Elle est

fortement corrélée à la couleur visuelle ($r=-0,66^{**}$), aux coordonnées chromatiques (L^* ($r= -0.65^{**}$), a^* ($r=0.58^{**}$) et c^* ($r=-0,67^{**}$)), couleur de l'ostiole ($r=0,38$), fissures de l'épiderme ($r=0,48$) et à la forme des tâches de l'épiderme ($r=0,47$). La troisième fonction représente 5,51 % de la variation totale et est liée essentiellement à l'indice de maturité ($r=-0,45$), à la symétrie du fruit ($r=0,6^{**}$) et à la couleur des lenticelles ($r=0,52^{**}$) (Tableau 13). Globalement, ces résultats sont conformes à ceux rapportés dans des études pomologiques similaires (Mars *et al.*, 1998 ; Papadopoulou *et al.*, 2002 ; Saddoud *et al.*, 2008 ; Darjazi, 2011 ; Saddoud *et al.*, 2011 ; Almajalia *et al.*, 2012 ; Gaaliche *et al.*, 2012 ; Ciarmiello *et al.*, 2015 ; Khadivi *et al.*, 2018).

Caliskan *et al.* (2017) et Khadivi *et al.* (2018) ont d'ailleurs signalé, pour d'autres espèces, l'importance de la caractérisation pomologique et chimique dans l'évaluation de la variabilité. Ces auteurs ont mis en lumière l'utilité de la sélection de variables hautement discriminantes dans l'optimisation, le maintien et la gestion de ces ressources génétiques.

Tableau 12. Matrice de de corrélations entre les caractères agro-morphologiques et physico-chimiques des géotypes de figes évalués. Seulement les corrélations importantes sont présentées

	Poids	Longueur	Largeur	Longueur pd.	Longueur pédoncule	Longueur du col	Largeur col	Diamètre ostiole	Epaisseur épiderme	TSS	Volume	L*	c*	h*	Forme du fruit	Symétrie du fruit	Présence du miellat	Couleur épiderme	Facilité d' épluchage	Fissure sur épiderme	Couleur secondaire	Forme couleur scd.	Abondance Lenticelles	Cavité du fruit	AT	Indice de Maturité
Poids	1	,768**	,945**	,048	,739**	,348**	,393**	,178*	,418**	,495**	,783**	,312**	,237**	-,074	,155	,213*	,293**	,190*	,173*	-,029	-,046	-,118	,219**	,264**	,016	,180*
Longueur		1	,697**	,170*	,669**	,267**	,311**	,158	,385**	,343**	,660**	,104	,028	,098	,179*	,122	,072	,176*	,320**	-,007	-,144	-,056	,188*	,254**	,050	-,139
Largeur			1	,002	,731**	,345**	,384**	,183*	,364**	,484**	,735**	,344**	,282**	-,130	,272**	,267**	,245**	,198*	,131	-,080	,003	-,124	,202*	,275**	,012	-,162
Longueur pd.				1	,111	-,145	-,110	,003	,051	-,056	,033	,030	,094	-,056	-,072	,007	-,146	,034	,044	-,031	,003	-,163	-,131	,062	,044	-,101
Largeur pd.					1	,326**	,368**	,201*	,321**	,376**	,633**	,201*	,096	-,061	,064	,003	,181*	,094	,095	,047	-,083	,171*	,154	,342**	,097	,216*
Longueur du col						1	,968**	,222**	,076	-,033	,342**	,268**	,249**	-,010	,070	,002	,125	,152	,054	-,028	-,065	-,111	,131	,393**	,079	-,068
Largeur du col							1	,208*	,124	-,112	,399**	,244**	,231**	,002	,066	-,008	,152	,147	,051	-,012	-,077	-,078	,118	,367**	,099	-,113
Diamètre ostiole								1	,150	-,148	,115	,119	,107	-,003	,092	,068	,012	,120	,025	,113	,038	-,093	-,043	-,077	,082	-,130
Epaisseur de l'épiderme									1	,379**	,340**	,198*	,151	-,079	-,046	,034	,098	,131	,059	,206*	-,048	-,062	,001	,002	,162	,255**
TSS										1	,416**	,187*	-,101	-,043	-,137	,100	-,059	-,011	-,075	-,144	-,112	,104	-,119	-,018	,047	,181*
Volume											1	,186*	,155	-,004	,110	,189*	,143	,117	,057	-,020	-,055	-,053	,208*	,233**	,048	-,156
L*												1	,863**	,292**	,223**	,211*	,039	,690**	,031	,307**	,265**	,389**	-,136	-,165	,003	-,044
c*													1	,334**	,294**	,218*	,047	,668**	-,026	,284**	,220*	,382**	,188*	-,128	,026	-,050
h*														1	,236**	,278**	-,141	,179*	,116	,025	,251**	,152	,093	,028	,011	-,009
Forme du fruit															1	,496**	,146	,065	,170*	-,156	,029	-,136	-,138	,011	,006	-,032
Symétrie du fruit																1	,268**	-,021	,155	,173*	-,146	,006	-,123	,127	,090	-,047
Présence du miellat																	1	-,048	,037	,115	,186*	,088	,176*	-,053	,133	-,146
Couleur épiderme																		1	,054	,284**	,292**	,408**	,173*	-,071	,052	-,057

Facilité d'épluchage	1	,068	,003	-,068	,128	,018	-,074	-,069
Fissure sur épiderme	1	,304**	,082	,088	,225**	,072	-,119	
Forme couleur scd.			1	,251**	,133	,116	,055	-,037
Forme couleur scd.				1	,223**	-,072	-,096	,095
Abondance lenticelles					1	,410**	-,093	,112
Cavité du fruit						1	-,061	-,061
AT							1	-,681**
Indice de maturité								1

Longueur pd. : Longueur du pédoncule ; Largeur pd. : Largeur du pédoncule ; Forme couleur scd. : forme de la couleur secondaire ; TSS : solides solubles totaux, AT : acidité titrable

Tableau 13. Vecteurs propres des principaux axes de l'analyse en composantes principales ACP. Les valeurs supérieures à |0.45| sont marquées en gras

	Composantes principales									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Poids	,865**	,285	,065	-,101	-,222	-,002	,048	,016	-,025	,045
Longueur	,690**	,316	,363	,175	-,211	,083	,002	,020	-,087	,157
Largeur	,850**	,237	,014	-,168	-,236	-,026	,126	-,019	-,030	,077
Longueur du pédoncule	,006	-,136	,381	-,142	-,191	,136	,050	-,282	-,165	,301
Largeur du pédoncule	,723**	,294	,257	-,035	-,056**	,021	,106	-,144	-,101	,126
Longueur du col	,579**	,040	-,152	,321	,496	-,150	,162	-,258	,202	-,139
Largeur du col	,610**	,084**	-,107	,276	,460	-,169	,153	-,216	,168	-,172
Ostiole diamètre	,280	,038	,160	-,032	,235	,107	,124	-,113	,315	-,100
Épaisseur de l'épiderme	,430	,119	,314	-,269	-,041	,074	-,313	,196	,054**	-,070
Solides solubles totaux	-,466	-,228	-,133	,285	,316	-,150	,174	,053**	-,011	,370
Volume	,745**	,291	,104	-,052	-,146	,008	,091	-,011	-,224	-,063
Acidité titrable	,070	,027	,397	-,338	,498	-,413	-,028	,156	-,025	,086
Indice de maturité	-,197	-,066	-,454	,414	-,328	,410	,075	-,202	-,028	,068
L*	,585**	-	-,146	-,083	,046	,100	-,093	,134	,024	,097
a*	-,581**	,652**	-,051	-,235	-,064	-,065	,076	-,182	,045	,103
b*	,138	-,077	-,154	,113	,009	-,045	-,118	-,035	,097	-,210
c*	,512**	-	-,186	-,147	,092	,105	-,101	,076	-,005	,094
h°	-,136	,676**	,289	,443	-,113	-,122	,049	,097	-,008	-,440
Forme du fruit	,199	-,190	-,324	-,508	-,039	-,050	,410	-,146	-,042	-,223
Symétrie du fruit	-,215	,028	,604**	,423	,181	,115	-,014	,119	,167	,013
Forme apicale	-,143	-,283	,355	,044	,064	-,129	,211	,230	,080	,325
Abscission du pédoncule	,188	,126	-,207	,311	,006	,091	-,394	,057	-,141	-,062
Couleur ostiole	-,110	,381	,053	-,132	,164	,116	-,222	-,252	,140	,144
Présence du miellat	,224	,261	-,288	-,323	,115	-,212	-,167	,053	,227	,115
Couleur du miellat	,022	,127	,166	-,039	,297	,483	-,007	,067	-,322	-,083
Couleur de l'épiderme	,443	-	,046	,035	,035	,079	-,085	,192	,086	,112
Stries de l'épiderme	,154	,664**	,072	,303	,226	,245	,276	,182	-,088	,271
Facilité d'épluchage	,144	,093	,199	,265	-,257	,075	-,205	-,016	,464	,222
Fissures sur l'épiderme	-,132	,487	,184	-,200	,307	,441	-,159	,116	,244	-,079
Succulence du fruit	,029	,229	-,298	-,258	,275	,094	-,040	,381	-,289	-,057

Couleur secondaire de l'épiderme	-,196	,414	-,180	-,431	,083	,099	,100	-,152	,244	,257
Forme de la couleur secondaire	-,286	,473	-,176	,092	-,039	-,201	,078	,200	-,215	,039
Abondance des lenticelles	,176	,494	-,298	,263	-,087	-,148	-,078	,133	-,017	,222
Couleur des lenticelles	-,285	-,061	,518**	-,115	-,001	-,138	,217	,076	-,265	-,013
Taille des lenticelle	,110	,381	-,291	,182	,023	-,180	-,096	,376	-,009	-,072
Couleur de la pulpe	,039	,050	,204	,064	-,309	-,188	,481	,079	,188	-,210
Texture de la pulpe	-,120	,013	-,271	-,022	-,072	,230	,432	,272	,213	,184
Cavité du fruit	-,407	-,119	,247	-,335	-,203	,244	-,034	,160	,273	-,325
Quantité de graines	,065	,079	-,014	,052	,339	,518**	,265	-,100	-,170	-,122
Taille de graines	,245	,118	-,189	-,037	-,125	,168	,233	,467	,276	-,055
% de la variance	12,315	9,978	5,518	5,330	5,206	5,075	4,744	4,341	4,092	3,666
% cumulatif	12,315	22,293	27,810	33,141	38,347	43,422	48,166	52,507	56,599	60,264

4. Analyse du dendrogramme et du diagramme de dispersion

L'analyse par grappes de la méthode paire-groupe non pondérée UPGMA (Unweight Pair Group Method with Arithmetic mean) a été établie à partir du coefficient de la distance euclidienne, pour l'étude des similitudes entre ces accessions. Un polymorphisme élevé a été révélé et les génotypes ont été répartis en deux grands groupes homogènes. Le premier comprend 32 génotypes, subdivisés en 2 sous-groupes distincts A et B. Le premier sous-groupe (A) contient 21 génotypes dont, entre autres, "Ghoudan", "Brown Turkey", "Elhamri", "Fassi" et "Conadria", qui se caractérisent essentiellement par un large diamètre d'ostiole (5 à 7 mm), une absence du col, une forme globulaire du fruit avec un indice de 0,99 et un poids compris entre 23 et 60 g et des traits géométriques importants (largeur et longueur moyennes sont respectivement de 34,66 mm et 39,14 mm). Les fruits de ce sous-groupe, de couleur foncée ($L^* = [23-39]$, $c^* = [5-11]$ et $h = [177-200^\circ]$), sont peu succulents et difficilement épluchables avec des fissures irrégulières.

Le deuxième sous-groupe (B) renferme 11 accessions, dont "Bellonie", "INRA 2105", "Bourjassout Blanca", et "Zerouali". Ils se caractérisent par des fruits rouge-pourpres ($L^* = [16-33]$, $c^* = [3-10]$ et $h = [348-359^\circ]$) avec des lenticelles abondantes de couleur rose et un poids oscillant entre 37 et 50 g. De forme globulaire avec un indice moyen de 0,97, ces

fruits sont légèrement acides (de 0,5 à 1,5%) et présentent une texture grossière et un taux de solides solubles totaux situé entre 17 et 24 °Brix (figure 28).

Le deuxième groupe (II) est composé de 106 accessions subdivisées en trois sous-groupes C, D et E. Le premier sous-groupe est composé de 24 génotypes, dont essentiellement "Abgati", "Chaari", "Royal Black" et "Zerqui". De forme oblongue aplatie et d'un indice moyen de 0,88, les fruits de ce sous-groupe ont un poids faible (26 g en moyenne), un petit diamètre d'ostiole et un épiderme très épais et légèrement facile à éplucher. Ces fruits au jus acide, ont une teneur moyenne en STT de 21 %. En outre, ce cluster se caractérise par une couleur vert-brune (faibles valeurs de luminosité, faible Chroma et faible angle de teinte). Par ailleurs, les génotypes du sous-groupe (D) au nombre de 71, ont eu une couleur vert-clair ($L^*=[44-89]$, $c^*=[25-50]$ et $h=[92-180^\circ]$) et un poids de fruit moyen oscillant entre 35 et 55 g. Ces fruits sont de forme oblongue, relativement sucrés et peu acides ($0,1 < \text{pH} < 1\%$). Le dernier sous-groupe (E) renferme 11 génotypes ayant des fruits à poids élevé (60 à 87 g) de longueur comprise entre 38 à 49 mm et largeur de 50 à 61 mm. Ce groupe présente des fruits à peau claire où les coordonnées L^* , c^* ont les valeurs les plus élevées variant de 64 à 80 et de 34 à 63, respectivement. De forme oblongue et de stries intermédiaires avec des fissures longitudinales, leurs fruits renferment une grande quantité de graines et présentent un indice de maturité important (de 26 à 79) (Figure 28).

De chacun des deux clusters, un génotype s'est distingué de ses sous-ensembles voisins. Pour le groupe (I), le génotype "White Adriatic" forme une branche éloignée des deux sous-groupes A et B, de par la couleur jaune-vert de son épiderme ($L^*=54,37$, $c^*=38,94$ et $h=97,65$), contrairement aux autres génotypes du même groupe avec qui il se partage les autres caractères. De même, le génotype "INRA 2205" a été particulièrement distingué des trois sous-groupes du deuxième cluster (II) (figure 28). Cette dissimilitude à l'égard des deux sous-groupes C et D, est matérialisée principalement par le poids et la clarté du fruit, largement élevés chez ce génotype. Ces résultats montrent la grande variabilité de la collection quoi qu'une homonymie y soit détectée pour les types "Ghoudan" et "El Quoti Lbied" (Figure 28).

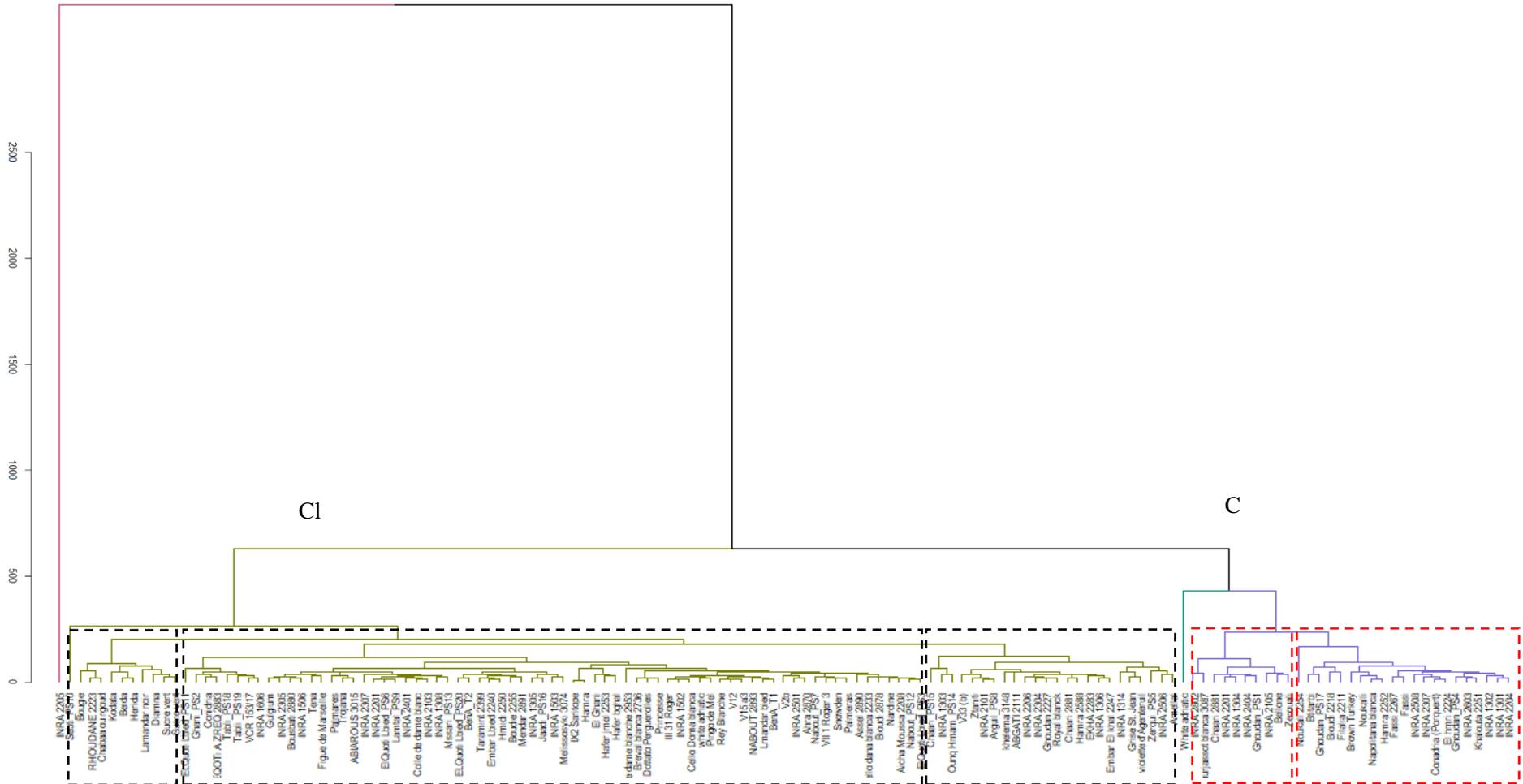


Figure 28. Classification hiérarchique ascendante des génotypes de figes comestibles étudiés à partir des caractères agro-morphologiques, colorimétriques et physico-chimiques par la méthode de la distance euclidienne

5. Conclusion

Cette étude a montré une grande variabilité au sein de la collection et informe sur la richesse de l'espèce au Maroc. L'ensemble des descripteurs pourraient être considérés comme outils complémentaires dans l'évaluation de l'ampleur de cette diversité. Pour autant que nous le sachions, il s'agit de la première tentative de criblage par la combinaison d'un grand nombre de descripteurs morphologiques, chromatiques et physico-chimiques pour cette large collection, voulant simplifier sa gestion, et donc sa préservation et son exploitation. Les variables hautement discriminantes ont été identifiées dans une perspective d'optimiser les ressources dans les travaux ultérieurs éventuels, et des cas d'homonymie et de synonymie probables, pourront ainsi évités.

Chapitre I. 2. Analyse et criblage des propriétés biochimiques des fruits entiers de la collection du figuier

1. Analyse descriptive

Le criblage des attributs biochimiques de la figue a montré une variabilité très hautement significative ($p < 0,001$) (Tableau 14), attribué principalement au facteur génétique. Les teneurs en sucres solubles totaux, facteur principale du goût et de la douceur, ont varié de 9,77 à 17,71 g/100 g MS, avec une moyenne de $12,08 \pm 1,26$ g/100 g MS. Les génotypes locaux "Zerqui_PS5", "El Quoti Lbied_PS3" et "Rhoudane 2227" ont été les plus sucrés aux concentrations respectives de 15,1, 14,53 et 14 g/100 (Tableaux 14 et 15). Ces teneurs sont, globalement, en accord avec les travaux d'Ersoy *et al.* (2007), Aljane *et al.* (2009), Çalışkan et Polat (2011) et Sedaghat et Rahemi (2018).

Les teneurs en polyphénols totaux (PT) ont varié entre 22 et 417,56 avec une moyenne de 142,74 mg GAE/100g MS, et plus élevées chez "White Adriatic", "INRA 2304" et "Ghoudan_PS1", dont les moyennes respectives étaient de 415, 322 et 288 mg GAE/100g MS. Toutefois, "INRA 1606", "INRA 1503" et "Rey Blanche" ont été les moins riches en polyphénols avec des teneurs moyennes de 25,33, 28,67 et 40,89 g GAE/100g MS, respectivement (Tableaux 14 et 15). Ces résultats s'accordent avec plusieurs travaux antérieurs (Bucić-Kojić *et al.*, 2011 ; Çalışkan et Polat 2011 ; Harzallah *et al.*, 2016 ; Wojdyło *et al.*, 2016), mais inférieures à ceux rapportés par d'autres études (Del Caro et Piga, 2008 ; Dueñas *et al.*, 2008). Selon la littérature, les PT de la figue sont essentiellement, comme pour d'autres fruits tels les pommes et les abricots, concentrés dans l'épiderme (Liu *et al.*, 2002 ; Solomon *et al.*, 2006 ; Çelik *et al.*, 2008).

Les concentrations en flavonoïdes totaux (FT) ont été élevées chez "White adriatic_102" (103,7 mg CE/100g MS), "INRA 1301" (101 mg CE/100g MS) et "INRA 1306" (96,05 mg CE/100g MS), néanmoins, plus faibles chez "Kadota", "Rey blanche" et "Diamna", dont les valeurs moyennes respectives étaient de 14,6, 14,5 et 15,35 mg CE/100 g MS (Tableaux 14 et 15). Ces résultats s'accordent avec les études menées par Konyalıoğlu *et al.* (2005), Marinova *et al.* (2005) et Solomon *et al.* (2006). Etant l'un des principaux polyphénols des végétaux, les flavonoïdes représentent plus de la moitié des composés phénoliques naturels (Kamiloglu *et al.*, 2016 ; Wojdyło *et al.*, 2016). Dans les fruits, le ratio FT/PT se présente à des niveaux très variables (Kamiloglu *et al.*, 2016). Pour l'ensemble, ce caractère se situe entre 0,09 et 0,87. Les flavonoïdes, classés comme

"composés environnementaux", sont souvent synthétisés en réponse directe aux conditions environnementales et dépendent, généralement de la lumière ultraviolette et des niveaux de CO₂ (Caldwell *et al.*, 2005).

Les anthocyanes totaux (AT) ont fluctué entre 0,45 et 57,47 mg de cy-3-rutinoside/100 MS avec une moyenne de 13,57 ±10,1 g/100 MS. "INRA 2105", "Burjasot Blanca" et "INRA 1302" ont présenté les niveaux les plus élevés qui sont respectivement de 52,95, 42,57 et 40,92 mg/100g MS (tableaux 14 et 15). Avec des valeurs propres de 0,45 et 2,69 mg/100 g MS, "Sucre vert" et "INRA 2307" ont été les moins riches. Néanmoins, AT ont été extrêmement faibles chez les cultivars "Felalia" et "Trojana" au point qu'ils n'ont pas été détectés. Comparés à d'autres fruits tels les cerises et les pommes, ces composés sont concentrés au niveau de l'épiderme et particulièrement abondants chez les fruits de couleur foncée (Solomon *et al.*, 2006 ; Del Caro et Piga, 2008). Les anthocyanes les plus répandues chez la figue sont la cyanidine, la delphinidine, la malvidine, la pélargonidine et la péonidine, qui sont généralement des glycoconjugués (Solomon *et al.*, 2011 ; Slatnar *et al.*, 2011 ; Kamiloglu *et al.*, 2016).

Les proanthocyanidines totales (PAT) ont été détectées à des concentrations généralement faibles variant de 0,18 à 10,01 mg/100g MS. "Mendar Noir" (8,51 mg/100g MS) et "Cuello Dama Blanca" (6,64 mg/100g MS) ont eu les valeurs les plus élevées, tandis que les plus faibles étaient observées chez les cultivars "INRA 2101", "Tena" et "Conedria", avec des concentrations inférieures à 1mg/100 g MS. Toutefois, les TPA n'ont pas été détectés chez les cultivars "INRA 1314" et "Princesse". D'après ces résultats, les figues contiendraient plus de proanthocyanidines que le vin rouge et le thé (Mawa *et al.*, 2013 ; Aksoy, 2015). En général, ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés par Gu *et al.* (2004), Vallejo *et al.* (2012), et Kamiloglu et Capanoglu (2013).

L'activité antioxydante, évaluée selon trois principes biochimiques a montré une large variabilité entre les cultivars ($p < 0,001$). La capacité du piégeage des radicaux libres de DPPH a varié de 34,61 à 1468,41 avec une moyenne de 541,88 ± 8,3 mM Trolox eq/100g MS (tableaux 14 et 15). Les cultivars "Kahlouta" (488,2 mM Trolox eq/100g MS), "INRA 2501" (451,36 mM Trolox eq/100g MS) et "INRA 2603" (433,5 mM Trolox eq/100g MS) ont présenté le potentiel antioxydant le plus élevé, tandis que les génotypes "INRA 1314", "Trojana" et "Noukali" ont été dotés des plus faibles capacités, avec des valeurs moyennes de 20,92, 46,04 et 46,6 ± 5,25 mM Trolox eq/100g MS, respectivement. Ces

résultats sont semblables à ceux rapporté par d'Olivera *et al.* (2009) et Manian *et al.* (2008).

Dans le test de piégeage des radicaux d'ABTS^{•+}, l'activité antiradicalaire a oscillé entre 31,32 à 658,2 mM Trolox eq/100g MS avec une moyenne de 425,5 ± 4,97 mM Trolox eq/100g MS. Les valeurs les plus élevées de ont été enregistrées par les géotypes "V12" (658,2 mM Trolox eq/100g MS) et "El khal" (632 mM Trolox eq/100g MS) (tableaux 14 et 15). Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par Solomon *et al.* (2006). De même, les résultats de l'essai de blanchiment du β-carotène ont varié de façon significative entre les cultivars. La capacité d'inhibition de la peroxydation de l'acide linoléique a oscillé dans un intervalle allant de 73,5 à 824,31 mM Trolox eq/100g MS, avec une moyenne de 403,42 ± 8,38 mM Trolox eq/100g MS. "Melissosyki", "Hmidi" et "El Qoti Lezreq" ont montré les plus forts taux d'inhibition de la peroxydation.

Il a été remarqué que des géotypes ayant de grandes capacités antiradicalaires présentent des teneurs élevées en flavonoïdes et d'anthocyanes totaux, dont les concentrations sont comprises entre 76 et 103 mg CE/100g MS et entre 28 et 48 mg de cyanidin-3-rutinoside/100g MS, respectivement. Des études récentes ont rapporté la grande capacité des figes à inhiber les radicaux libres, compte tenu de leurs fortes teneurs en antioxydants, notamment les flavonoïdes et les anthocyanes (Solomon *et al.*, 2006 ; Manian *et al.*, 2008 ; Olivera *et al.*, 2009 ; Bey *et al.*, 2016).

Tableau 14. Analyse de la variance des données du criblage biochimique de la collection du figier

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Carré moyen ANOVA
Sucres solubles totaux (g équivalent du glucose/100g MS)	9,77	17,72	12,08	1,26	17,72 ***
Polyphénols totaux (mg EAG/100g MS)	22,00	413,11	142,74	9,78	413,11 ***
Flavonoïdes totaux (mg CE/100g MS)	8,11	112,82	42,04	9,06	112,82 ***
Anthocyanes totaux (mg cy-3-rutinoside équivalent /100g MS)	0,41	57,45	13,57	10,3	57,45 ***
Proanthocyanidines totales (mg/100g MS)	0,18	10,01	2,24	1,82	10,01 **
DPPH (mM Trolox eq/100g MS)	20,92	488,2	180,74	8,3	1468,41 ***
ABTS (mM Trolox eq/100g MS)	31,32	658,21	425,5	4,97	2292,93 ***
Blanchiment de la β-Carotène (mM Trolox eq/100g MS)	73,5	824,31	403,42	8,38	2314,54 ***
IC 50 DPPH (µg/ml)	0,38	27,28	12,36	4,95	2,18***
ABTS	0,2	5,78	3	1,39	0,54***
B-Carotène/ acide linoléique	3,58	22,76	14,22	2,96	2,33***

** ; *** denote significant of difference at level 0,01 and 0.001 respectively

GAE: équivalent de l'acide gallique; CE : catéchine équivalent,

Tableau 15. Teneurs moyennes des propriétés biochimiques étudiés chez quelques cultivars de la collection

Genotypes	Sucres ST (g/100g MS)	Polyphénols (mg GAE/ 100 g MS)	Flavonoïdes (mg CE/ 100 g MS)	Anthocyanes (mg cyanidin-3-rutinoside/ 100 g MS)
White Adriatic_102	13,43 ± 0 abc	315,33 ± 8,3 a	103,71 ± 2,9 a	19,63 ± 5,6 bcd
Colle de Dame Blanc	10,62 ± 0,2 efg	194,22 ± 5,6 ab	30,47 ± 4,2 cde	16,74 ± 2 def
Brown Turkey	13,39 ± 0,1 abc	119,78 ± 0 bcd	78,71 ± 6,7 a	33,69 ± 4,4 ab
Dottato Perguerolles	10,57 ± 0,6 egh	89,78 ± 6,1 cde	22,24 ± 4,2 def	17,78 ± 1,2 bcd
Bellone	13,93 ± 0,9 a	58,67 ± 7,9 def	54,82 ± 8,7 abc	26,04 ± 15,8 abc
Princesse	13,82 ± 1 a	52 ± 7,3 ef	25,47 ± 3,7 def	6,2 ± 4,7 fgh
Violette d'Agenteruil	11,34 ± 1,1 efg	110,89 ± 6,3 cde	23,12 ± 4,6 def	17,15 ± 18,4 bcd
Pingo de Mel	13,66 ± 0 ab	148,67 ± 5,7 abc	36,06 ± 5,4 bcd	8,27 ± 4,7 efg
El Ghani	12,29 ± 0,9 bcd	154,22 ± 55 abc	18,71 ± 4,2 ef	22,11 ± 0,3 bcd
Bougie	12,12 ± 1,3 cde	105,33 ± 4,1 cde	48,12 ± 2,5 bcd	4,34 ± 3,2 ghi
Chaari 2881	10,57 ± 2,1 ghi	186,44 ± 3,1 ab	66,94 ± 3,3 ab	28,52 ± 1,8 ab
Sucre vert	10,57 ± 1,5 fgh	78,67 ± 9,9d ef	30,76 ± 7,9 cde	1,45 ± 0,9 i
Nardine	11,75 ± 1,1 def	186,44 ± 5,7ab	19,59 ± 6,2 ef	11,99 ± 3,5 def
Palmeras	10,97 ± 0,4 efg	82 ± 0 def	62,53 ± 4,6 abc	10,95 ± 6,1 efg
Trojana	10,56 ± 0,2 ghi	47,28 ± 5,1 f	34,29 ± 1,2 cde	0,62 ± 0,3 i
Figue de Marseille	12,18 ± 0,65 cde	146,44 ± 8,9 abc	24,29 ± 7,9 def	11,37 ± 1,5 efg
Conadria	10,6 ± 0,4 fgh	110,89 ± 1,4 bcd	19 ± 4,6 ef	12,81 ± 6,4 def
Abiarous	11,65 ± 0,7 def	97,56 ± 9,1cde	36,65 ± 3,7 bcd	7,65 ± 6,7 fgh
Amellal	11,9 ± 0,13 cde	82 ± 9,4 def	71,94 ± 7,9 ab	5,17 ± 5 fgh
Burjasot Blanca	11,99 ± 1 cde	262 ± 3,1 a	29,59 ± 0,4 cde	42,57 ± 6,4 a
Cuello D. Blanca	13,74 ± 0,8 ab	273,11 ± 5,7 a	54,59 ± 4,2 abc	14,47 ± 2,3 def
Nabout 2893	11,09 ± 1,8 efg	180,89 ± 1,6 ab	29,29 ± 5,8 cde	3,1 ± 0,9 hi
Noukali	11,21 ± 0,2 efg	105,89 ± 9,4 cde	20,18 ± 1,2 ef	23,77 ± 9,1 bc
Royal Blanck	11,47 ± 1 def	137,56 ± 10,7 bcd	27,82 ± 2,1def	26,45 ± 0,6 abc
Kadota	13,81 ± 1,4 bcd	145,33 ± 8,1 bcd	14,59 ± 0,8 bcd	7,23 ± 3,2 fgh

Sucres ST : Sucres solubles totaux ; PAT : Proanthocyanidines totales

Les valeurs sont présentées comme moyennes ± les écart-types. Les différentes lettres (a-h) représentent des différences statistiquement significatives entre les cultivars à p < 0,05.

Tableau 16. Teneurs moyennes des propriétés biochimiques étudiés chez quelques cultivars de la collection (Suite)

Genotypes	PAT (mg de cyanidine/ 100 g MS)	DPPH (mM Trolox eq/100g MS)	ABTS (mM Trolox eq/100g MS)	β-Carotène (mM Trolox eq/100g MS)
White Adriatic_102	0,82 ± 0,8 c	616,13 ± 17,9 bcde	1349,25 ± 10,9 bcd	862,28 ± 25,1 cdef
Colle de Dame Blanc	6,64 ± 2,7 a	311,53 ± 16,1 efg	1464,51 ± 14,6 bcd	1043,8 ± 28,4 cdef
Brown Turkey	2,32 ± 0,3 c	757,67 ± 14,2 ab	1313,23 ± 16b cde	680,75 ± 26,7 def
Dottato Perguerolles	1,82 ± 0,8 c	320,76 ± 21,8 efg	1767,06 ± 20,2 abc	1270,73 ± 24,2 abc
Bellone	1,32 ± 0,2 c	597,67 ± 15,3 bcde	917,03 ± 24,7 def	1543,03 ± 24,2 ab
Princesse	0,5 ± 0,2 c	446,91 ± 26,1 def	1536,54 ± 20,9 bcd	1384,19 ± 24,6 abc
Violette d'Agenteruil	2,91 ± 0,9 bc	686,9 ± 26,1 bcde	1792,27 ± 27,4 abc	726,13 ± 23,2 abc
Pingo de Mel	1 ± 0,1 c	656,13 ± 20,3 bcde	1468,11 ± 32,6 bcd	1679,18 ± 28,4 ± a
El Ghani	1,36 ± 0,1 c	716,13 ± 13,6 bcde	1788,67 ± 40,8 abc	589,98 ± 28def
Bougie	1,32 ± 0,2 c	509,98 ± 10,9 def	1925,54 ± 36,9 ab	1361,49 ± 32,5 abc
Chaari 2881	1,18 ± 0,4 c	508,45 ± 39,2 def	1230,39 ± 29,6 bcde	1134,58 ± 56,7 cdef
Sucre vert	1,82 ± 0,8 c	311,53 ± 12,3 efg	1327,64 ± 30,6 bcde	1225,35 ± 28,4 bcd
Nardine	1,59 ± 1 c	522,29 ± 19,6 bcde	1641 ± 15,8 abc	1021,12 ± 32,1 cdef
Palmeras	2,09 ± 0,4 c	522,29 ± 15,7 def	1986,77 ± 96,8 a	771,51 ± 48,4 cdef
Trojana	2,96 ± 0,3 b	171,53 ± 10,6 h	828,42 ± 33,6 def	1316,11 ± 38,4 abc
Figue de Marseille	1,27 ± 0,1 c	551,52 ± 13,5 bcde	236,28 ± 15,8 f	680,75 ± 22def
Conadria	0,73 ± 0,1 c	745,36 ± 12,1 ab	603,67 ± 23,9 def	1089,2 ± 42,5 cdef
Abiarous	0,96 ± 0,1 c	591,52 ± 13,7 bcde	275,9 ± 20,4 ef	1406,88 ± 11abc
Amellal	5,37 ± 4,8 ab	591,52 ± 16,6 bcde	1684,22 ± 15,3 abc	1179,96 ± 64,2 bcd
Burjasot Blanca	1,41 ± 0,2 c	1086,89 ± 10,8 a	1918,34 ± 24,3 ab	1679,18 ± 28,4 a
Cuello D. Blanca	2,68 ± 0,2 bc	719,21 ± 11,3 ab	1223,18 ± 56 bcde	1316,11 ± 28,4 abc
Nabout 2893	1,82 ± 0,5 c	613,06 ± 14,8 bcde	971,06 ± 24,8 def	408,45 ± 12 f
Noukali	1,05 ± 0,1 c	897,66 ± 12,2 a	2004,78 ± 37,3 a	1815,33 ± 64,2a
Royal Blanck	0,86 ± 0,6 c	966,89 ± 15,6 a	1849,9 ± 18,8 ab	1270,73 ± 92,5 abc
Kadota	0,96 ± 0,1 c	389,99 ± 17,4 bcde	956,65 ± 23,2 a	317,68 ± 85,1

Sucres ST : Sucres solubles totaux ; PAT : Proanthocyanines totales

Les valeurs sont présentées comme moyennes ± les écart-types. Les différentes lettres (a-h) représentent des différences statistiquement significatives entre les cultivars à p < 0,05.

2. Concentration maximale inhibitrice de 50% des radicaux (IC50)

L'IC50 est une variable qui informe sur la qualité du piégeage des radicaux pour chacun des tests anti-oxydatifs. Le potentiel antioxydant, inversement proportionnel à la valeur IC50, est plus important quand de très petites concentrations sont requises pour piéger la moitié des radicaux. Selon le tableau 17, l'IC50 pour le test DPPH a varié sensiblement entre les géotypes de 0,38 à 27,28 µg/ml avec une moyenne de 12,36 ± 4,96 µg/ml. Les plus faibles concentrations inhibitrices de 50% des radicaux libre ont été observées chez "Grosse Dame Blache" (0,38 µg/ml) et "Bioudie" (0,48 µg/ml). Les valeurs moyennes d'IC50 les plus prometteuses sont celles obtenues par le test ABTS dont les concentrations ont oscillé dans un intervalle très restreint [0,2-5,78 µg/ml] avec une moyenne globale de 3 ± 1,38 µg/ml (tableau 14). Les cultivars "Bioudie" et "INRA 2304" ont présenté le plus grand potentiel antioxydant. Le test blanchissement du β-carotène a montré un potentiel d'inhibition de la peroxydation de l'acide linoléique variant entre 3,58 et 22,76 µg/ml avec une moyenne de 14,22 ± 2,96 µg/ml. Parmi tous les cultivars, "Kadota" et "Royal Blanck" ont montré les valeurs d'IC50 les plus faibles (3,58 et 7,18 µg/ml, respectivement) et donc le pouvoir antioxydant le plus important.

Ces résultats sont, généralement conformes à ceux d'Ercisli *et al.* (2012), Debib *et al.* (2014) et Veberic et Mikulic-Petkovsek (2016). Il est à noter que les concentrations IC50 révélées par le test ABTS ont été les plus prometteuses par rapport aux autres tests. Ces concentrations sont supérieures à celle décrites par des études similaires (Veberic *et al.*, 2008b ; Pande et Akoh, 2010 ; Slatnar *et al.*, 2011 ; Ercisli *et al.*, 2012). Il est à signaler également, que la plupart des cultivars aux potentiels inhibiteurs des radicaux libres d'ABTS• les plus élevés ont enregistré des concentrations importantes en polyphénols.

Contrairement à des études antérieures (Solomon *et al.*, 2006 ; Caro et Piga, 2008 ; Çalişkan et Polat, 2011), certains cultivars à fruits sombres et violets possèdent, généralement, des potentiels inhibiteurs inférieurs à ceux exprimés par des cultivars à fruits clairs. Ceci pourrait être dû à des différences, non seulement dans les concentrations en composés antiradicalaires, mais aussi à la nature de ces derniers et les proportions des fractions qui les composent, notamment les anthocyanes, principaux contributeurs à ce processus (Pinelo *et al.*, 2005 ; Turkmen *et al.*, 2006 ; Solomon *et al.*, 2006 ; Makris *et al.*, 2007).

tableau 17. Concentrations minimales inhibitrices (IC50) de certains cultivars de la collection

Genotypes	Concentration maximale inhibitrice en µg/ml de la matière sèche						
	IC50 (DPPH)	IC50 (ABTS)	IC50 (β-Car)	Genotypes	IC50 (DPPH)	IC50 (ABTS)	IC50 (β-Car)
Diamna	12,26	4,70	12,47	Amellal	16,61	2,09	13,47
Btitarbi	16,20	1,99	14,79	Assel 2890	17,67	4,31	14,91
Zerouali	10,68	3,77	21,57	Bioudie	0,42	0,32	10,03
Lamandar Noir	19,58	4,57	16,64	Bourjassout	14,69	2,27	16,59
Ztaniti	12,00	1,47	15,03	Cello Dama	8,56	3,57	12,82
Lmandar Bied	7,05	1,66	9,51	Blanca 2233			
Ahl Souss 2201	6,95	3,77	21,98	El hmiri 2224	15,89	4,57	14,63
INRA 1301	27,28	2,62	9,13	El Qouti Lezreq	10,78	1,47	12,75
INRA 1305	12,48	2,27	17,18	2883			
INRA 1302	8,25	4,13	13,09	Fassi 2267	6,85	1,04	12,57
INRA 2603	7,09	1,51	15,28	filalia	8,91	1,04	21,79
INRA 2304	9,31	0,79	13,31	Grosse Dame	0,38	3,44	19,37
INRA 1306	20,75	2,98	11,08	Blanche2953			
INRA 2508	11,22	4,85	9,31	Hafer Jmel	16,77	5,21	16,01
Palmeras	3,88	5,50	22,76	2253			
Conadria	13,43	2,84	14,26	Hamra 2252	21,70	4,90	10,62
VCR 153/17	14,05	1,03	15,68	Nabout 2893	8,60	4,85	15,08
Colle de Dame	2,50	0,20	12,73	Noukali 2254	5,48	2,69	18,83
Blanc				Rhoudane 2227	21,78	4,26	14,31
Abiarouss 3015	21,05	0,22	13,33	Royal Blanck	9,89	5,11	7,18
Aicha Moussa	9,49	3,21	15,56	Taramint 2399	12,17	4,13	10,86
2208				Cuello Dama	15,90	5,78	13,18
				Blanca			
				Kadota	16,01	1,83	3,58
				Herida	19,82	3,21	15,68

β-Car: test de blanchiment de β-carotène/ linoléique acide

3. Corrélations entre les propriétés biochimiques des figes

Toutes les variables ont été impliquées dans une analyse de corrélation bivariée du modèle de Pearson afin d'identifier les relations entre elles. Dans cette étude les données chromatiques, précédemment évalués dans le premier chapitre de cette partie, ont été incriminées pour le même objectif. Toutefois, cette analyse s'est particulièrement concentrée sur les indices L*, c* et h°, puisque a* et b* reflètent indirectement la teinte et le chroma (Francis, 1980).

Les corrélations significatives au niveau de 0,05 ou 0,01 sont marquées en gras dans le tableau 18. A l'exception sauf des proanthocyanidines, les anthocyanes totaux ont été positivement corrélés à un niveau de p<0.01 avec tous les antioxydants. Ces corrélations ont été exprimées par des coefficients de 0,183 et 0,173 pour les polyphénols et les flavonoïdes totaux respectivement. L'activité de piégeage des radicaux libres de DPPH

s'est révélée positivement corrélée aux anthocyanes totaux ($r=0.342$) et aux proanthocyanidines totales ($r=0.140$). En outre, les flavonoïdes totaux étaient négativement corrélés à la clarté de la couleur "L*" ($r=-0,161^{**}$) et au Chroma "c*" ($r=-0,259^*$), ce qui signifie que plus le fruit est foncé, plus il renferme de flavonoïdes totaux. Dans certaines études antérieures, ces coefficients de corrélation sont considérés comme peu importants (Bucić-Kojić *et al.*, 2011 ; Wojdyło *et al.*, 2016). Dans notre cas, ces niveaux de corrélations peuvent être expliqués par le nombre élevé de cultivars inclus dans l'étude (135 génotypes), relativement aux autres études pour lesquelles la taille de l'échantillon était restreinte. Ce qui pourrait signifier que ces résultats sont significatifs et que les phénols totaux, en particulier les anthocyanes totaux seraient probablement les principaux facteurs contribuant à la capacité antioxydante des figues (Pinelo *et al.*, 2005 ; Turkmen *et al.*, 2006 ; Bucić-Kojić *et al.*, 2011). Les coefficients de corrélation peuvent fournir des informations sur les variables potentiellement importantes dans l'évaluation des génotypes du figuier (Norman *et al.*, 2011). Des caractères significatifs et fortement corrélés, telle la couleur de la peau, peuvent être utilisés pour prédire d'autres traits, en particulier les teneurs en composés antioxydants, et ainsi considérés comme moyen de caractérisation et de discrimination d'une collection plus large.

Tableau 18. Matrice des corrélations entre les composés biochimiques, l'activité antioxydante et les coordonnées chromatiques impliqués dans le criblage de la collection de figuier. Les corrélations significatives à un niveau de $p < 0,05$ et $p < 0,01$ sont marquées en gras

	Sucres ST	TA	TPA	TP	TF	DPPH	ABTS	B-Car.	IC 50 (DPPH)	IC 50 (ABTS)	IC 50 (β -Car)	L*	c*	h*
Sucres ST	1													
TA	0.004	1												
TPA	0.067	0.006	1											
TP	0.023	.183**	-0.058	1										
TF	-0.034	.177**	0.094	.165**	1									
DPPH	0.008	.342**	0.08	.140*	0.114	1								
ABTS	-0.029	0.068	0.008	0.025	-0.056	0.012	1							
B-Car.	-0.056	-0.008	-0.078	-0.096	0.072	-0.036	0.066	1						
IC 50 (DPPH)	-0.015	0,53**	0,345	0,245**	0,45**	0,340*	0.118	0,024	1					
IC 50 (ABTS)	-0.014	0.416**	0.439**	-0.219*	0.39**	-0.033	0.423**	0.07	0.089	1				
IC 50 (β -Car)	0.092	-0.105	0.201**	0.277*	0.29	-0.096	-0.054	-0.031	-0.627**	0.119	1			
L*	-0.043	-.442**	0.021	-0.172**	-.161**	-.287**	-0.033	0.019	-0.24	-0.197**	0.051	1		
c*	-0.023	-.488**	0.029	-0.159**	-.259**	-.373**	-0.031	-0.052	0.046	-0.120*	0.029	.866**	1	
h*	0.003	.397**	-0.002	.179**	.273**	.238**	0.008	0.071	-0.017	-0.049	-0.021	-.291**	-.337**	1

** . Corrélation est significative à un niveau de 0.01; * . Corrélation est significative à un niveau de 0.05

Sucres ST : Sucres solubles totaux ; AT : Anthocyanes totaux ; PAT : proanthocyanidines totales ; PT : Polyphénols totaux ; FT : flavonoïdes Totaux ; B-car : test de blanchiment de β -carotène/ linoléique acide

4. Analyse en composantes principales

Une ACP basée sur des coefficients de corrélation a été entreprise pour identifier les variables exprimant le maximum de la variance totale. Seules les variables présentant une charge supérieure à $|0,5|$ ont été considérées comme significatives pour chaque composante principale. En effet, une variance totale de 65 % a été exprimée par les 6 premières composantes (tableau 19). Les trois premières expliquent les anthocyanes, les flavonoïdes, l'activité de piégeage des radicaux DPPH•, la concentration IC50 pour les tests DPPH et ABTS et les coordonnées chromatique (L^* , c^* et h°). Ces variables, formant 61 % de l'ensemble, expliquent plus de 40 % de la variabilité totale observée (tableau 19). La première composante représente 21,6 % de la variance totale et est influencée, principalement, par les anthocyanes totaux ($r=0,73$), l'activité inhibitrice des radicaux DPPH• ($r=0,57$) et les coordonnées couleurs L^* et c^* ($r=-0,86$ et $r=-0,89$ respectivement). La deuxième composante exprime 10 % de l'inertie totale et est principalement corrélée aux flavonoïdes totaux ($r=0,81$), IC50 (DPPH) ($r=0,696$) et à l'angle de la teinte h° ($r=0,53$). La troisième fonction renferme 9,2 % de la variation totale et est définie essentiellement par les anthocyanidines totales et IC50 du test ABTS ($r=0,72$ et $r=0,686$, respectivement).

Tableau 19. Vecteurs propres des composantes principales de l'analyse PCA

	Composantes principales					
	1	2	3	4	5	6
TS Sugars	0.094	0.059	0.06	0.325	-0.511	-0.022
TA	0.73	0.166	-0.118	0.061	0.098	0.051
PAT	-0.037	0.053	0.723	0.213	0.017	-0.314
PT	0.057	0.516	-0.087	0.524	0.203	0.241
FT	0.085	0.81	0.154	-0.117	-0.081	-0.109
DPPH	0.576	0.067	-0.09	0.125	-0.09	-0.11
ABTS	0.075	-0.003	0.025	0.099	0.848	-0.036
β -Car	-0.025	0.184	-0.017	-0.799	0.121	0.052
IC 50 (DPPH)	0.201	0.696	-0.192	0.377	-0.128	-0.116
IC 50 (ABTS)	0.482	0.454	0.244	-0.584	0.066	-0.108
IC 50 (β -Car)	-0.104	-0.155	0.686	-0.152	-0.214	0.556
L^*	-0.864	-0.011	-0.194	0.018	-0.018	-0.044
c^*	-0.889	-0.086	-0.122	0.086	0.01	0.029
h^*	0.403	0.536	-0.223	-0.082	-0.054	-0.01
% of Variance	21.645	10.08	9.195	8.281	7.97	7.849
Cumulative %	21.645	31.725	40.919	49.201	57.17	65.019

Sucres ST : Sucres solubles totaux ; AT : Anthocyanes totaux ; PAT : proanthocyanidines totales ; PT : Polyphénols totaux ; FT : flavonoïdes totaux ; B-car : test de blanchiment de β -carotène/linoléique acide
Les valeurs supérieures à $|0,5|$ sont marquées en gras

5. Classification hiérarchique ascendante (CHA)

L'analyse UPGMA, utilisant le coefficient de la distance euclidienne, a été établie pour mettre en évidence les similitudes biochimiques entre les accessions. Les génotypes ont été regroupés en trois principaux clusters C1, C2 et C3. C1 comprend 45 génotypes, subdivisés en 2 sous-groupes distincts C1-1 et C1-2. Le premier sous-groupe (C1-1) contient 36 génotypes, entre autres "ElQuoti Lbied_PS3", "Brown Turkey", "Gulgium", "El Ghani" et "Pingo de Mel", caractérisés par une couleur de l'épiderme cernée entre le violet clair et le vert, avec L^* et c^* situés respectivement entre 35 et 65 et entre 10 et 40, un potentiel antioxydant important selon les méthodes DPPH et ABTS (entre 200 et 300 et entre 350 et 600 mM Trolox eq/100g MS, respectivement). Les teneurs en sucres solubles totaux sont également élevées dans ce groupe (11-14,5 mg d'équivalent de glucose/100g MS). Le second sous-groupe (C1-2) comptait 9 génotypes dont "Bellone", "Ghoudan", "Chaari", "Zerouali" et "Fassi". C'est un agglomérat de cultivars ayant une couleur foncée de l'épiderme où la luminosité (L^*) varie de 15 à 29 et la saturation de couleur (c^*) de 2 à 9. Ils sont également caractérisés un pouvoir antiradicalaire important, principalement contre les radicaux DPPH•, et dotés de teneurs élevées en anthocyanes totales avec des concentrations variant entre 170-250 mM Trolox eq/100gdw et 12-41 mg cy-3-rutinoside/100g MS, respectivement (figure 30).

Le deuxième groupe (C2) ne comptant que trois cultivars (Kahlouta, INRA2501 et INRA2503), aux valeurs les plus élevées de piégeage des radicaux libres de DPPH• (433-488 mM Trolox eq/100g MS) et des teneurs en sucres solubles totaux très similaires dont la moyenne globale est de $11,6 \pm 1.37$ mg/100g MS. Le dernier groupe (C3) contient 87 accessions regroupées en deux sous-ensembles. Le premier (C3-1) contient 37 génotypes ayant une couleur de peau vive (vert-jaune) et où les valeurs de luminosité et de Chroma sont respectivement comprises entre 65 et 80 et entre 35 et 63. Ils ont également montré une faible quantité totale d'anthocyanes et d'activité antiradicalaire (DPPH) avec les valeurs respectives inférieures à 13 mg de cy-3-rutinoside/100g MS et 120 mM Trolox eq/100g MS. Le deuxième sous-groupe abritant 28 génotypes discriminés par leur couleur de peau claire avec les valeurs les plus élevées de luminosité comprises entre 50 et 83 et leur faible concentration en anthocyanes totaux et anthocyanidines dont les niveaux sont respectivement inférieurs à 15 mg cy-3-rutinoside/100g MS et 5 mg /100g MS. Ces génotypes ont également enregistré une activité antioxydante faible à moyenne (figure 30).

Les résultats de l'analyse CHA ont engendré de nombreux sous-ensembles qui peuvent être reconnus comme étant des groupes représentatifs des composés bioactifs étudiés. La forte variation phénotypique révélée dans le matériel génétique impliqué dans cette étude est fort probablement liée au facteur génétique, tant que la collection est conduite dans les mêmes conditions édaphoclimatiques. Étant donné que ces résultats ne permettent pas de clarifier toute corrélation potentielle entre l'origine géographique des génotypes étudiés et les clusters qui en résultent, une analyse moléculaire est certes nécessaire pour confirmer l'hypothèse d'une base génétique commune. Chaque cluster identifié peut servir à la sélection de cultivars à des fins industrielles particulières. Ils peuvent également être utilisés dans les programmes de création variétale de figuier pour combiner les caractères désirables.

6. Conclusion

Le criblage biochimique a révélé une large variabilité ($p < 0,01$) au sein du matériel génétique étudié. Il s'agit de même du premier criblage biochimique d'une telle taille pour l'espèce au Maroc. De fortes concentrations de composés phénoliques, en particulier de flavonoïdes totaux et d'anthocyanes, ont été essentiellement révélées dans les figes de couleur foncée ayant également affiché les fortes teneurs en polyphénols totaux. Les anthocyanes totaux se sont avérés être les plus influents dans l'activité antioxydante des génotypes évalués. L'analyse en composantes principales a déterminé que les anthocyanes, les flavonoïdes et les coordonnées chromatiques sont les propriétés biochimiques les plus explicatives de la variance. Ce travail pourrait servir de guide exploitable pour la sélection des cultivars potentiels pour l'industrie, et aussi pour les programmes de sélection et de croisement futurs.

Chapitre I. 3. Sélection raisonnée de cultivars prometteurs pour des analyses approfondies

Dans ce chapitre, l'étude s'est limitée à un nombre de cultivars représentatifs de la collection à l'aide de méthodes statistiques multivariées, dont principalement l'analyse canonique, pour examiner la corrélation potentielle entre les données morpho-agronomiques et biochimiques et pour vérifier la force du modèle.

1. Analyse canonique des corrélations

L'analyse canonique des corrélations (ACC) permet de déterminer des variables, variantes canoniques, révélant la plus forte corrélation possible entre les aspects morpho-agronomiques et biochimiques. Le modèle canonique a été statistiquement significatif selon une probabilité lambda de Wilks (λ) de 0,004, $F(84, 179, 49) = 3,18$ et $p < 0,0001$ (Tableau 20). Ce qui pourrait dire que les traits morphologiques et biochimiques sont probablement liés. La probabilité exprimée par λ de Wilks représente un effet inverse informant sur le pourcentage de variance non partagée entre les variables. Le modèle révèle une probabilité importante exprimée par $1 - \lambda = 1 - 0,004 = 0,996$, et donc significatif avec un grand effet.

Seules sont prises en considération, les fonctions canoniques à variance importante. Ainsi, les deux premières fonctions, exprimant respectivement 57,75 % et 27,11 % de la variance totale, ont été considérées (Tableau 21). Les cinq dernières fonctions ont exprimé de faibles niveaux d'inertie, généralement inférieurs à 7% (6,36, 4,73, 3,93, 1,38 et 0,73 %, respectivement). La corrélation entre les groupes de variables, révélée par le modèle, est largement formulée par les deux premières fonctions qui sont très hautement significatives ($p < 0,001$) (Tableau 21).

Les variables morpho-agronomiques les plus explicatives du modèle, sont principalement l'ostiole du fruit, la largeur, le poids et la coordonnée chromatique (c^*), et dans un deuxième niveau, l'épaisseur de l'épiderme et sa clarté (L^*) et l'angle de la teinte (h°). Ces variables sont négativement corrélées à la première fonction. Ceci a été étayé principalement par les structures factorielles au carré (sf^2), qui indiquent le degré de variance par lequel la variable observée contribue à la variable critère synthétique (Tableau 20). Pour les attributs biochimiques, les teneurs en flavonoïdes et en

proanthocyanidines ont, par ordre d'importance, la plus large contribution dans la première variable synthétique. Une augmentation dans la variance de la première fonction est associée à une augmentation des concentrations en proanthocyanidines, flavonoïdes et de la teinte foncée du fruit, mais aussi à une diminution des caractères géométriques du fruit.

Dans la deuxième fonction, les anthocyanes, les polyphénols et l'activité de piégeage des radicaux libres du DPPH•, ont eu le plus grand effet (Tableau 20). Une variance élevée de cette fonction s'accompagne d'une diminution des teneurs totales en anthocyanes et en polyphénols, en plus de la largeur du pédoncule et de l'activité antiradicalaire (DPPH).

Tableau 20. Analyse canonique des corrélations pour les traits morpho-agronomiques (ensemble 1) et les composants biochimiques (ensemble 2) les plus discriminants pour les fonctions 1 et 2

Variable	Fonction 1			Fonction 2			h ² (%)
	Coef	sf	sf ²	Coef	sf	sf ²	
Poids Du fruit	-0,087	-0,732	53,574	-0,631	-0,148	2,198	55,772
Longueur	-0,098	-0,39	15,209	0,557	-0,178	3,169	18,378
Largeur	-0,122	-0,738	54,432	-0,151	-0,166	2,76	57,192
Longueur du pédoncule	-0,165	0,056	0,312	-0,405	-0,327	10,704	11,016
Largeur du pédoncule	-0,087	-0,334	11,158	-0,38	-0,661	43,703	54,861
Longueur du cou	0,225	-0,266	7,05	0,081	0,099	0,973	8,023
Largeur de cou	-0,193	-0,372	13,801	-0,189	0,011	0,013	13,814
Largeur Ostiole	-0,246	-0,76	57,787	-0,041	-0,292	8,516	66,304
Épaisseur de la peau	-0,219	-0,582	33,895	-0,329	-0,099	0,981	34,875
L*	0,421	-0,469	22,001	0,078	0,493	24,317	46,318
C*	-0,753	-0,662	43,843	0,791	0,593	35,21	79,053
h°	0,333	0,481	23,13	-0,357	-0,109	1,181	24,311
R ² c			88,59				79,06
Sucres solubles totaux	-0,098	-0,09	0,809	-0,172	-0,186	3,464	4,273
Anthocyanes totaux	0,43	0,429	18,373	-0,575	-0,851	72,498	90,872
Proanthocyanidines totales	0,425	0,598	35,759	0,36	0,346	11,99	47,749
Phénols totaux	0,229	0,483	23,371	-0,262	-0,635	40,343	63,714
Flavonoïdes totaux	0,599	0,711	50,599	0,223	0,447	19,971	70,57
DPPH	0,018	0,13	1,701	-0,146	-0,485	23,498	25,2
ABTS	-0,276	-0,048	0,234	-0,055	-0,314	9,883	10,116
Test de signification statistique pour le modèle complet de l'analyse canonique							
Valeur propre							9.21
Corrélation canonique							0.949
Lambda de Wilk							0.004
Degré de liberté							179.49
Valeur-p							<0.0001
Les structures factorielles (sf) supérieures à 0,45 sont indiquées en gras. Coef = coefficient de fonction canonique standardisé ; sf = structure factorielle ; sf ² = structure factorielle au carré ; h ² = coefficient de communalité							

dvTableau 21. Variables canoniques et statistiques connexes

Variantes	Valeur propre	% de la variance	% cumulatif de l'écart	Canonical corrélation	Corrélation canonique carrée	Lambda de Wlik	Valeur F	Pr>F
1	7,763	55,746	55,746	0,941	0,886	0,004	3,182	0.001
2	3,775	27,109	82,854	0,889	0,791	0,033	2,173	0.001
3	0,887	6,366	89,22	0,686	0,47	0,157	1,403	0,064
4	0,66	4,736	93,957	0,63	0,397	0,296	1,256	0,182
5	0,547	3,931	97,888	0,595	0,354	0,492	1,079	0,383
6	0,192	1,38	99,268	0,401	0,161	0,761	0,689	0,777
7	0,102	0,732	100	0,304	0,093	0,907	0,578	0,745

2. Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

La combinaison des données morpho-agronomiques et biochimiques, justifiée par le modèle canonique, a permis via une analyse CHA selon un coefficient de la distance euclidienne (figure 31), la révélation de cinq groupes principaux. Le cultivar "Ounq Hmam PS_14" s'est distingué de l'ensemble et est caractérisé par un fruit ayant une couleur relativement foncée et le petit calibre (poids =13 g, et volume =20 cm³), le plus long col (6,8 mm) et la plus haute teneur en solides solubles totaux (47,5%). Le deuxième groupe (24 cultivars) renferme les figues de couleur foncée à faible intensité de couleur (c*), au poids de fruit intermédiaire, une facilité d'épluchage et une forme symétrique et aux teneurs importantes en anthocyanes totaux. Le troisième groupe incarne 51 cultivars à fruits clairs à pédoncule long, sans col et riches en flavonoïdes et un faible taux de sucre. Le quatrième groupe comprend 45 accessions caractérisées par des gros fruits clairs moyennement sucrés, avec de faibles concentrations en anthocyanes et en flavonoïdes. Le dernier groupe se compose de 15 cultivars à fruits de peau blanche ayant les poids plus élevés. Ils présentent en outre, une grande capacité de piégeage des radicaux libres d'ABTS et d'inhibition de la peroxydation de l'acide linoléique.

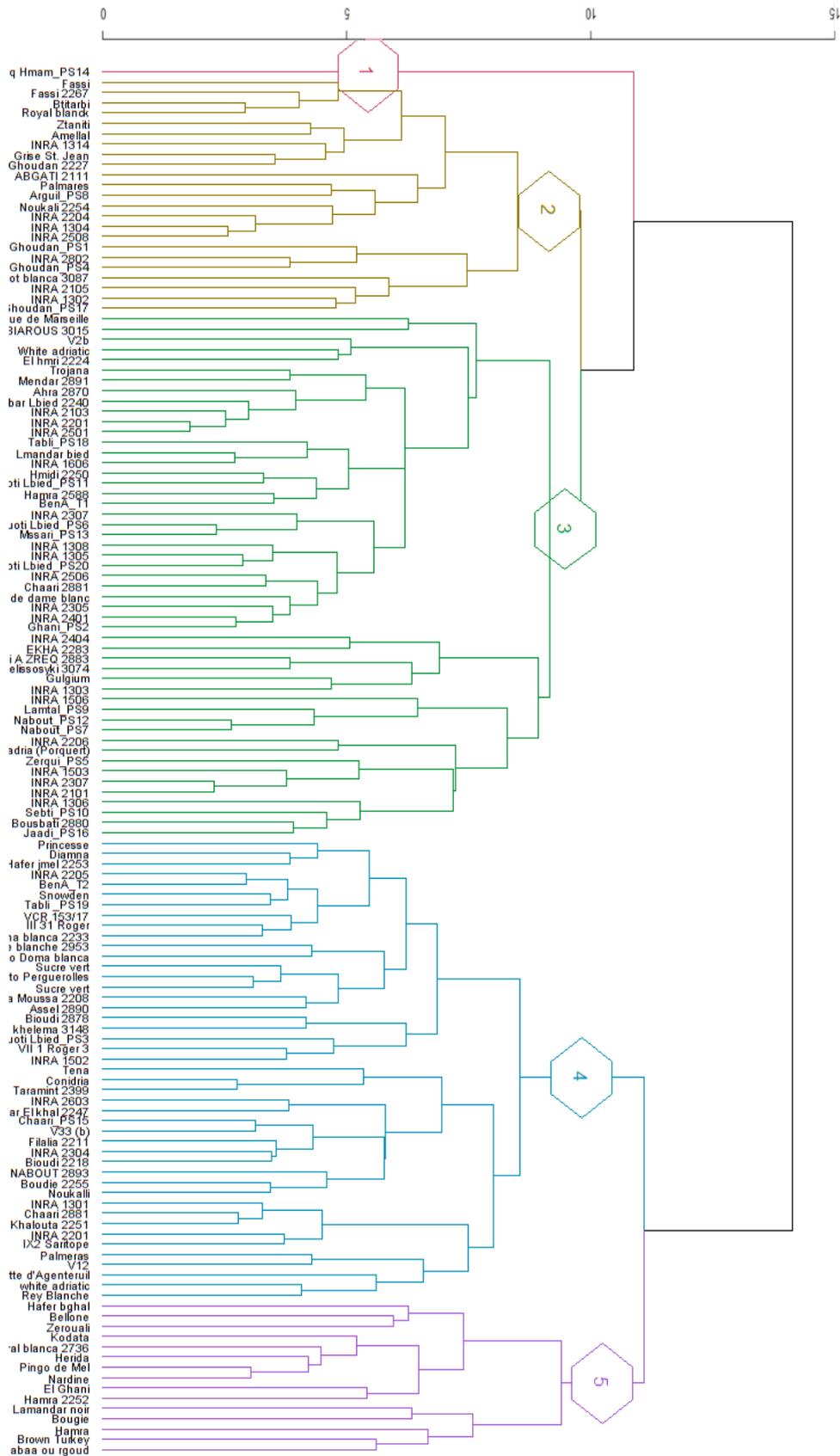


Figure 31. Classification hiérarchique ascendante des génotypes de figes étudiés à partir des attributs morpho-agronomiques et biochimiques à distance euclidienne. Les grappes discriminées ont été spécifiées par des nombres et des couleurs uniques

3. Sélection des génotypes représentatifs de la collection

La sélection des génotypes prometteurs et représentatifs de la collection du figuier a été réalisée sur les différents clusters. Ces individus combinent des niveaux importants pour les variables discriminantes révélées par l'analyse canonique (figure 32). Les valeurs moyennes des propriétés biochimiques et morpho-agronomiques les plus représentatives de la variabilité sont résumées dans les tableaux 22 et 23.

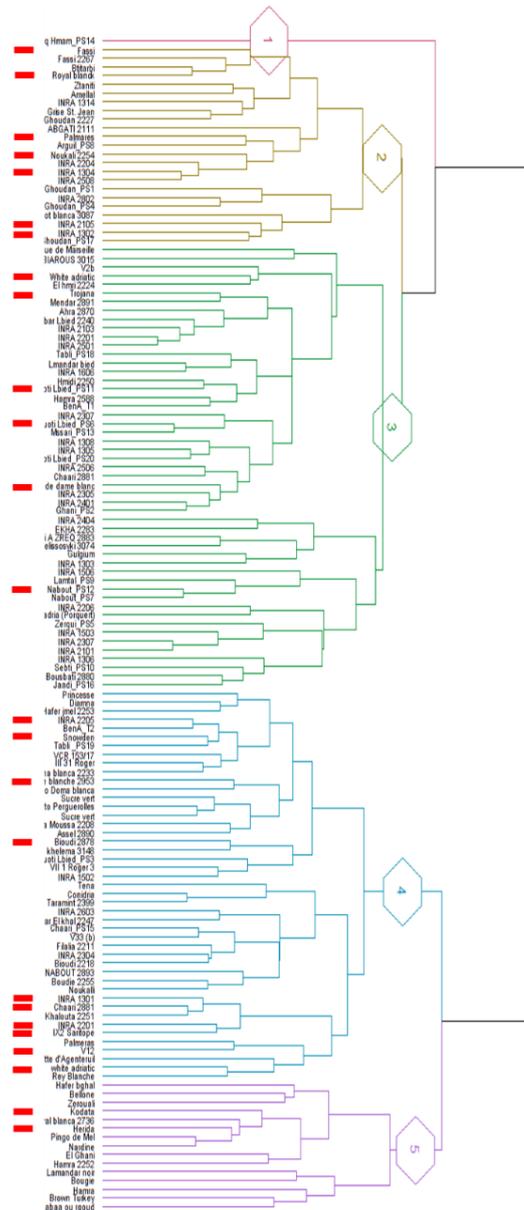


Figure 32. Répartition des génotypes sélectionnés dans le dendrogramme de criblage morpho-agronomique et biochimique. Les génotypés en question sont repérés par des bondes rouges

Tableau 22. Caractéristiques des géotypes sélectionnés selon les descripteurs révélés discriminants par l'analyse canonique

Cultivars	PT	FT	AT	PAT	DPPH	L*
Breval Blanca	252.5± 3.6	63.4± 6.5	24.8± 2.5	0.97± 0.1	8316 ±6.9	63.9 ±6.9
Cuello Dama Blanca	408.1± 6.6	30.5± 2.9	16.74± 1.4	6.64± 1.9	2084 ±2.3	60.2 ±16.5
El Quoti Lbied	364.4± 1.6	25.18± 7.8	5.37± 1.6	2± 0.1	1428 ±1.42	48.8 ±1.7
Fassi	524.7± 5	30.18± 3.8	14.8± 5.3	2.05± 0.7	1752 ±0.98	31.8 ±3.7
Ghoudan	131.2± 6.9	43.12± 11	11.16± 7	1.5± 0.5	1778 ±0.73	34.9 ±6.3
Kadota	327.2± 11.2	14.59± 7.6	7.23± 2.2	0.96± 0	1730 ±1.27	56.1 ±7
Nabout	90.7± 4.1	29.29± 4	3.1± 0.6	1.82± 0.4	8810 ±3.37	64. ±3.19
Noukali	478.6± 7.1	20.18± 0.8	23.8± 6.4	1.05± 0	1795 ±1.5	32.4 ±11.87
Palmeras	93.35± 4.9	47.2± 5.3	11± 4.3	2.09± 0.3	1802 ±1.9	83.6 ±5.37
Snowden	424.5± 7	27.53± 1.76	5.37± 0.8	3.96± 0.7	1476 ±1.6	39.8 ±1.48
White Adriatic	132.7± 3.8	83.7± 10	19.6± 3.9	0.82± 0.5	1521 ±1.37	60.5 ±3.43
Sarilop	114.8 ±7.5	21 ±0.8	21.8 ±0.7	1.71 ±0	808.44 ±18	60 ±1.2
Chaari	233.3 ±6.9	31.9 ±0.9	10.3 ±3.3	1.55 ±0.1	262.3 ±18.5	38.3 ±0.9
Bioudi	192 ±10	73.7 ±0.9	11.8 ±1.4	4.78 ±3.8	416.14 ±33.8	20.4 ±0.4
Breba Blanca	137 ±6.1	36.3 ±7.6	6.82 ±1	1.91 ±0.2	703.8 ±21	70.8 ±1.5
INRA 2304	322 ±2.2	51.94 ±1.5	9.92 ±8.3	1.46 ±0.5	505.3±3.1	29.7 ±1.8
INRA 2201	220.9 ±6.7	77.24 ±23.2	33.7 ±6.4	1.87 ±0.2	685.3 ±14	29.3 ±2.3
INRA 1302	165.3 ±14.4	35.76 ±3.5	40.9 ±3.3	1.59 ±0.2	974.5 ±24.6	31.5 ±0.4
INRA 1301	144 ± 4.4	101.06 ±0.6	20.5 ±13.4	1.23 ±0.3	623.8 ±19.4	24 ±2.3
Ournaksi	148.6 ±11	36.06 ±3.8	8.27 ±3.3	1 ±0.1	656.1 ±28.1	59.5 ±3
Herida	75.3 ±6.3	36.94 ±19.1	14.3 ±0.7	6.37 ±0.5	156.0 ±6.3	76.7 ±3
INRA 2105	214.2 ±11	25.4 ±7	47.9 ±13.4	4.73 ±0.9	289.4 ±18.2	33.1 ±0.7
INRA 1305	49.8 ±1.6	42.2 ±4.2	11.16 ±5.3	4.14 ±0.2	147 ±4.7	52.7 ±2.2
Trojana	47.3 ±3.6	34.29 ±0.9	0.62 ±0.2	2.96 ±0.2	171.5 ±25	77.2 ±2
Chetoui	111 ±8.9	708.81 ±6.3	18.13 ±1.3	2.2 ±1.6	48.3 ±5.9	60.1 ±2.6

PT : Polyphénols (mg GAE/100g dw); FT: Flavonoïds (mg CE/100g dw) ; AT : Anthocyanes (mg cy-3-ru eq/100g dw) ; PAT : Pronathocyanindines (cyanidine eq/ 100g dw); DPPH : piègeage des radicaux de DPPH (mmol TE eq / 100 g dw)

Tableau 23. Caractéristiques des géotypes sélectionnés selon les descripteurs révélés discriminants par l'analyse canonique

Cultivars	c*	h*	Poids (g)	Largeur (mm)	Ostiole (m)	Epaisseur de l'épiderme
Breval Blanca	36.3 ±3.4	103.5 ±3.2	46.4± 10.7	43.9± 4	5.62± 1.8	8.35± 1.5
Cuello Dama Blanca	33.4 ±2.3	100±4.8	27.1± 6.6	33.9± 2.8	4.62± 0.9	3.71± 0.5
El Quoti Lbied	37.3 ±1.1	95.7 ±9.	36.13± 7.8	39.5± 3.6	4.9± 0.6	3.05± 0.6
Fassi	10.3 ±0.4	215.93±16.8	26.92± 3.1	34.6± 2.4	3.81± 0.6	2.25± 0.6
Ghoudan	15.83 ±2.9	19.2±14.9	37.25± 6.2	38.9± 5.2	5.63± 1.9	3.24± 0.3
Kadota	37.44 ±4.6	106.4 ±5.6	61.53± 10.4	50.8± 3.9	7.69± 1.2	2.01± 1.2
Nabout	40.04 ±3.9	105.2 ±3.4	38.2 ± 7.1	38.4± 3.8	3.07± 2	5.91± 1
Noukali	6.2 ±0.3	356.1 ±12.8	27.3± 4.7	38.3± 2.3	4.23± 1	1.68± 0.5
Palmeras	42.12 ±7.7	102.6 ±7.4	34.9± 4.7	43.9± 3.1	5.81± 1.2	4.41± 0.9
Snowden	17.71 ±0.6	185.47 ±19.81	44.03± 10.9	46.67± 9.7	4.98± 2.9	2.84± 0.9
White Adriatic	36.08 ±1.1	527.7 ±15.42	26.22± 5.5	31.54± 2.9	4.6± 0.8	3.08± 0.9
Sarilop	40.71 ±0.6	100.54 ±1.4	55.8 ±1.5	41.53 ±0.7	7.53 ±1.1	1.49 ±1.4
Chaari	24.16 ±0.5	5.3 ±0.9	39.26 ±11.9	33.24 ±5.6	5.68 ±1.4	2.77 ±0.3
Bioudi	5.99 ±0.3	173 ±38.2	23.36 ±4.8	30.73 ±3.2	6.94 ±2.8	2.96 ±0.2
Breba Blanca	45.07 ±1.2	106.8 ±3.3	37.38 ±7.2	31.93 ±2.8	7.31 ±1.1	3.83 ±0.7
INRA 2304	10.12 ±0.5	9.04 ±2	38.77 ±2.9	33.11 ±4.4	5.52 ±2.1	4.72 ±0.9
INRA 2201	8.28 ±0.7	359.1 ±11	41.05 ±6.3	33.72 ±1.3	7.8 ±1.2	5.04 ±0.9
INRA 1302	1.98 ±0.2	200.8 ±21.4	30.58 ±3.4	40.72 ±0.7	5.74 ±0.3	2.96 ±0.1
INRA 1301	8.13 ±0.1	191.5 ±31.8	35.3 ±12.2	36.31 ±5.1	5.45 ±0.8	3.31 ±0.8
Ournaksi	34.98 ±2	96.2 ±2.7	48.07 ±9.3	42.18 ±3.2	5.8 ±1	6.51 ±0.8
Herida	44.51 ±0.3	102.5 ±3.9	47.25 ±4.1	43.47 ±2.1	4.62 ±1	3.99 ±0.2
INRA 2105	5.33 ±1.1	328.3 ±21.1	44 ±6.6	38.6 ±6.7	6.45 ±0.3	4.18 ±0.8
INRA 1305	27.31 ±0.8	77.65 ±3.6	28 ±7.6	34.9 ±2.8	5.29 ±2.1	3.6 ±0.3
Trojana	48.74 ±0.1	93.48 ±2.4	34.95 ±3.3	38.34 ±1.6	5.06 ±0.7	3.02 ±1.1
Chetoui	43.73 ±0.3	101.2 ±3	43.57 ±2.3	43.98 ±1.3	4.76 ±0.6	7.57 ±1.3

4. Apport du criblage multivarié et enchainement vers la valorisation

L'étude des isothermes et de la cinétique du séchage, a été appliquée aux variétés "Kadota" et "Sarilop" choisies pour leurs aptitudes morphologiques et biochimiques au processus. Eléments des groupes 4 et 5, respectivement, dans le dendrogramme (Figure 31), ces deux variétés présentent un épiderme fin de couleur claire (2 et 1.49 mm, respectivement) convenable au séchage pour sa rapidité de transfert de chaleur dans les tissus du fruit. En outre, ces variétés possèdent un poids de fruit élevé oscillant entre 35 et 55 g. Elles sont également caractérisées par une forme oblongue, une très faible concentration en acide citrique (0,35 et 0,4%, respectivement) et des teneurs moyennes en sucres solubles totaux (13,81 et 12,21 g/100 g MS, respectivement). De plus ces variétés sont dotées d'un profil biochimique prometteur leur conférant une activité antiradicalaire élevée (Tableau 19). Quant à l'étude de la composition en acides gras et la qualité antiradicalaire de l'huile des graines, les variétés "White Adriatic" et "Bourjassoute Noir" ont été sélectionnées en raison de leur forte composition en graines de la taille importante. En vue de mettre en lumière l'effet variétal sur la teneur en huile et sa qualité biochimique, deux clones locaux ont été étudiés pour le même objectif sans pour autant faire partie de la collection objet de l'étude antérieure, vu qu'ils présentent une abondance remarquable en graines.

I. Analyse des cultivars sélectionnés dans le proche infrarouge combiné à la chimométrie

1. Analyse spectrale

Les spectres FTIR observés entre 4000 et 450 cm^{-1} sont présentés dans la figure 33. Six zones d'absorbance ont été identifiées 3700-3000, 3000-2800, 1775-1725, 1700-1550, 1500-1300 et 1175-940 cm^{-1} . La première région est attribuée aux fibres, présents en grande quantité dans les figes fraîches. Le large pic apparu dans cette région est dû aux vibrations d'étirement O-H résultant de la liaison hydrogène dans la cellulose (Tableau 24). L'absorbance dans la région de 3000-2800 cm^{-1} est probablement attribuée aux vibrations de C-H, O-H et NH₃, qui proviennent des glucides, acides carboxyliques, acides aminés libres et des phénols. Les bandes dans la région de 1775-1725 cm^{-1} sont dues à l'étirement des groupes des carbonyles et celui des esters. Cette région d'absorbance se situe dans la fourchette de 1800-1700 cm^{-1} , liée à l'allongement de C=O de type ester carboxylique. Pour les pulpes, ce pic est probablement associé aux lipides

contenus dans les graines, alors que selon Terpugov *et al.* (2016), il a été attribué aux protéines. La vibration dans la région de 1700-1550 cm^{-1} est liée à la structure secondaire amide I et II de la protéine. Les bandes d'absorbance entre 1500 et 1300 cm^{-1} correspondraient aux groupes phosphodiester, et sont probablement le résultat de plusieurs pics faibles non différenciés. Selon plusieurs études, cette région comprend quatre groupes vibrations. Une première autour de 1392 cm^{-1} probablement plus attribuée aux glucides, aux acides gras ou acides aminés (Vongsvivut *et al.*, 2013). Une autre située à 1315 cm^{-1} , est associée au balancement de CH_2 (Schwanninger *et al.*, 2004), et une dernière approximativement à 1155 cm^{-1} résultant de l'étirement du C-O (Vongsvivut *et al.*, 2013). Enfin, les vibrations dans les régions 940-1175 cm^{-1} marquant un pic très fort et aigu, seraient probablement assignées au groupe C-OH ainsi qu'aux segments C-C et C-O dans la structure glucidique et C-O dans les phénols (Tableau 24).

Tableau 24. Principales empreintes biochimiques dans les spectres ATR-FTIR et composés biochimiques leurs sont attribués

Région d'absorbance (cm^{-1})	Attributions aux composés chimiques	Références
3700-3000	Liaison hydrogène intramoléculaire C(3)OH...O(5) C(6)O...O(H) (fibers)	Baranauskas <i>et al.</i> (2002) Schwanninger <i>et al.</i> (2004) Oh <i>et al.</i> (2005)
3000-2800	Étirement de C-H, O-H et NH_3 (attribués aux glucides, acides carboxyliques, acides aminés libres et acides phénoliques)	Movasaghi, <i>et al.</i> (2008)
1775-1725	Étirement de C=O (Esters)	Anjos <i>et al.</i> (2015) Chung <i>et al.</i> (2014) Dong <i>et al.</i> (2013) Bouyanfif <i>et al.</i> (2019)
1700-1550	Principalement l'étirement C=O (protéines)	Chen <i>et al.</i> (2013) Ying <i>et al.</i> (2017)
1500-1300	Dominé par les déformations de CH, CH_2 , and CH_3 (Acides organiques contenant des groupes phosphodiester)	Agrebi <i>et al.</i> (2019) Song <i>et al.</i> (2018)
1175-940	Étirement de C-OH, C-C et C-O (Phénols)	Masek <i>et al.</i> (2014) Leopold <i>et al.</i> (2011)

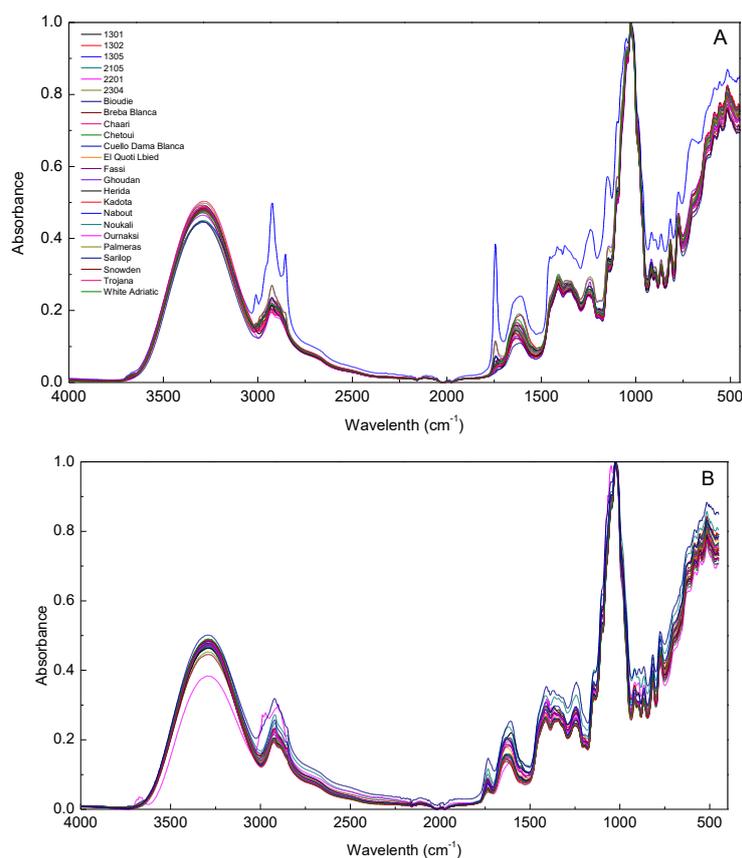


Figure 33. Spectres infrarouges (450 – 4000 cm^{-1}) des épidermes (A) et de la pulpe (B) des fruits de vingt-cinq cultivars

2. ATR-FTIR des principaux pics et de leurs aires calculées

Les principales régions de vibration ont été représentées individuellement dans les figures 34 et 35, dont les aires moyennes calculées sont résumées dans les tableaux 25 et 26. La première région de vibration a montré des différences significatives entre les pulpes [$F(55, 25)=7,24$, $p<0,001$] et les épidermes [$F(47, 23)=3,6$, $p<0,001$], et dont les aires respectives étaient de $350,5 \pm 15,6$ et $346,2 \pm 4,8$ (tableaux 25 et 26). La variété locale " Nabout " a enregistré l'absorbance la plus élevée dans les régions de 3000-2800 et de 1775-1725 cm^{-1} , dont les aires des pics correspondantes étaient $21,14 \pm 2$ et $1,83 \pm 0,9$ (Tableau 25). Ceci indique que 'Nabout' serait le plus riche en carbohydrates, en acides carboxyliques, en acides aminés libres et en lipides. Il convient de noter que la bande de 3000-2800 cm^{-1} a été représentée par deux pics, l'un à 2925 cm^{-1} et l'autre à 2855 cm^{-1} . La première est probablement liée à l'étirement C-H du groupe méthylène d'un lipide, alors que la seconde pourrait être dûe à l'étirement C-H (symétrique) de CH_2 des chaînes acyles lipidiques (Bouafif *et al.*, 2008). Contrairement à d'autres cultivars, le deuxième pic (2855 cm^{-1}) était remarquablement clair pour la variété 'Nabout' (figure 34). Dans les bandes

correspondant aux protéines ($1700-1550\text{ cm}^{-1}$), aux acides organiques ($1500-1300\text{ cm}^{-1}$) et aux phénols ($1175-940\text{ cm}^{-1}$), les absorbances et les aires les plus élevées ont été observées respectivement chez les cultivars 'INRA 2201', 'Snowden' et 'INRA 1305'. Les aires calculées pour les autres échantillons dans ces bandes ont montré des différences statistiquement significatives entre les échantillons $p < 0,01$ (Tableau 25).

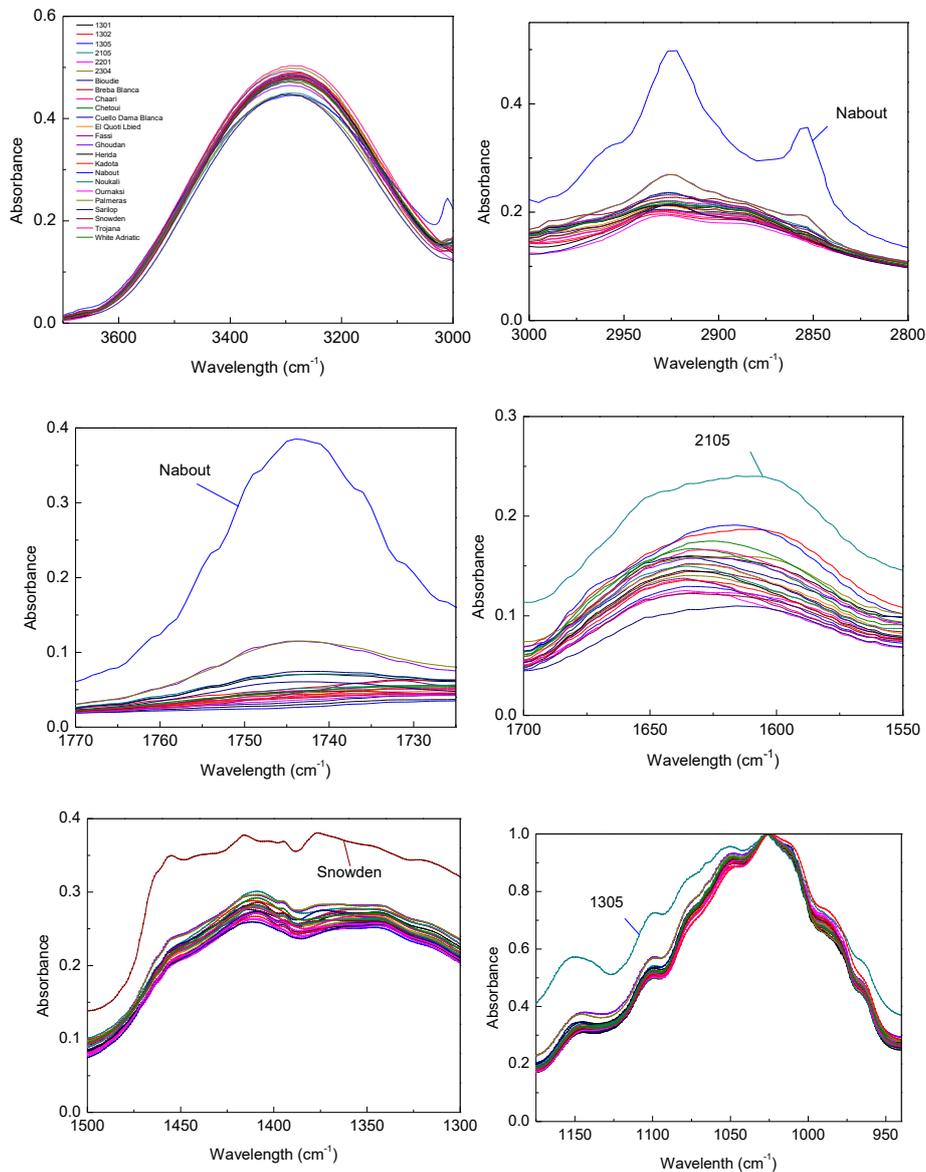


Figure 34. Spectres ATR-FTIR des principales bandes de vibration des échantillons de pulpe. Chaque spectre représente la moyenne de 3 analyses, qui correspondent chacun à l'accumulation de 128 balayages.

Tableau 25. Aires des principales bandes d'absorption dans les spectres ATR-FTIR intégré pour les échantillons de pulpes. Les valeurs moyennes \pm les erreurs-types de la moyenne sont présentées.

Régions principales de vibration (Pulp)	3700-3000 cm ⁻¹	3000- 2800 cm ⁻¹	1775- 1725 cm ⁻¹	1700 – 1550 cm ⁻¹	1500 – 1300 cm ⁻¹	1175 – 940 cm ⁻¹
INRA 1301	365.98 \pm 2.1	16.68 \pm 0.1	0.75 \pm 0.04	6.06 \pm 0.05	8.81 \pm 0.04	20.76 \pm 0.2
INRA 1302	383.09 \pm 1.6	14.03 \pm 0.02	0.26 \pm 0.03	7.43 \pm 0	8.85 \pm 0.02	21.19 \pm 0
INRA 1305	356.63 \pm 1	17.96 \pm 0.08	0.04 \pm 0.01	6.37 \pm 0.03	9.58 \pm 0.01	23.37 \pm 0.04
INRA 2105	328.06 \pm 5	18.08 \pm 0.2	0.85 \pm 0.06	7.97 \pm 0.08	9.1 \pm 0.05	21.58 \pm 0.13
INRA 2201	387.15 \pm 0.7	16.61 \pm 0.01	0.38 \pm 0.01	5.21 \pm 0.03	9.57 \pm 0.02	21.95 \pm 0.07
INRA 2304	379.81 \pm 1	16.21 \pm 0.1	0.16 \pm 0.01	5.66 \pm 0.02	9.57 \pm 0.03	22.08 \pm 0.06
Bioudie	334.05 \pm 8.2	19.19 \pm 0.5	0.94 \pm 0.14	5.46 \pm 0.12	9.04 \pm 0.06	20.47 \pm 0.3
Breba Blanca	335.25 \pm 2.3	18.01 \pm 0.04	0.18 \pm 0.01	6.22 \pm 0.06	9.46 \pm 0.04	22 \pm 0.21
Breval Blanca	296.21 \pm 4.6	20.31 \pm 0.3	1.33 \pm 0.1	5.03 \pm 0.07	8.14 \pm 0.01	17.74 \pm 0.3
Chaari	354.7 \pm 1.4	18.47 \pm 0.02	0.36 \pm 0	6.01 \pm 0.04	9.73 \pm 0	22.93 \pm 0.02
Chetoui	357.94 \pm 0.8	17.47 \pm 0.03	0.29 \pm 0.01	7.03 \pm 0.01	8.94 \pm 0.04	22.06 \pm 0.01
Cuello Dama Blanca	375.19 \pm 1.6	16.37 \pm 0.03	0.07 \pm 0.02	6.98 \pm 0.04	9.52 \pm 0.01	22.75 \pm 0.04
EL Quoti Lbied	370.92 \pm 0.3	16.36 \pm 0.03	0.13 \pm 0.01	6.44 \pm 0.01	9.37 \pm 0.01	21.76 \pm 0.04
Fassi	347.72 \pm 2.4	20.39 \pm 0.2	0.2 \pm 0.02	5.26 \pm 0.02	9.61 \pm 0.01	20.6 \pm 0.1
Ghoudane	323.24 \pm 14.3	19.69 \pm 1	1.12 \pm 0.26	5.55 \pm 0.24	9 \pm 0.1	19.94 \pm 0.8
Herida	364.43 \pm 0.3	17.3 \pm 0.04	0.08 \pm 0.01	6.89 \pm 0.05	9.63 \pm 0.02	23.05 \pm 0.04
Kadota	373.38 \pm 0.3	17.37 \pm 0.05	0.21 \pm 0	5.74 \pm 0.01	9.64 \pm 0.01	22.46 \pm 0
Nabout	247.07 \pm 9.5	21.14 \pm 2	1.83 \pm 0.9	5.66 \pm 1	8.78 \pm 0.46	21.95 \pm 4.9
Noukali	359.17 \pm 1.3	18 \pm 0.01	0.31 \pm 0.01	5.55 \pm 0.02	9.42 \pm 0.01	21.96 \pm 0.01
Ournaksi	377.35 \pm 0.5	17.15 \pm 0.05	0.15 \pm 0.01	5.53 \pm 0.06	9.73 \pm 0.01	22.63 \pm 0.01
Palmeras	302.89 \pm 5.7	20.48 \pm 0.4	1.24 \pm 0.12	5.25 \pm 0.08	8.75 \pm 0.05	19.68 \pm 0.42
Sarilop	351.5 \pm 5.1	20.83 \pm 0.2	0.93 \pm 0.1	4.88 \pm 0.01	9.84 \pm 0.09	22.56 \pm 0.17
Snowden	358.94 \pm 2.	18.64 \pm 0.1	0.43 \pm 0.05	5.43 \pm 0.03	9.91 \pm 0.03	23.02 \pm 0.17
Trojana	380.01 \pm 4.	14.48 \pm 0.2	0.23 \pm 0.01	7.21 \pm 0.01	8.92 \pm 0.05	21.38 \pm 0.16
White Adriatic	351.79 \pm 1.1	16.66 \pm 0.01	0.36 \pm 0.01	7.61 \pm 0.01	9.07 \pm 0.03	21.64 \pm 0.07
Moyenne	350.5 \pm 15.6	17.92 \pm 1.9	0.51 \pm 0.5	6.1 \pm 0.9	9.22 \pm 0.57	21.37 \pm 1.8
Carré moyen	4267.6***	11.32***	0.86***	2.34***	1.31***	15.15***
ANOVA						

***, indiquent une différence significative au niveau de 0,001

De même, pour les aires des pics correspondant à l'absorption des épidermes, l'ANOVA a montré des différences significatives entre tous les cultivars ($p < 0,01$) (Tableau 27). Dans la figure 36, les spectres des épidermes se sont montrés moins superposés par rapport aux pulpes. Ce qui indique que les cultivars sont relativement plus distingués à travers les empreintes FTIR de leurs épiluches. Dans la région de 3000-2800 cm⁻¹, des différences à un niveau de 5% [$F(47, 23) = 2,25, p = 0,009$] ont été révélées et les cultivars "Palmeras" et "Breval Blanca" ont eu les plus fortes absorbances (19,61 \pm 0,1 et 19,76 \pm 0,1, respectivement). Par ailleurs, les cultivars "Breval Blanca" et "Ghoudane" ont montré les plus forts niveaux dans la région de vibration des esters (1775-1725 cm⁻¹), "INRA 1301" et "EL Quoti Lbied" ont eu les plus fortes intensités dans la région des protéines (1700-1550 cm⁻¹), "Snowden", quant à lui, a montré une intensité supérieure dans la région 1500 - 1300 cm⁻¹ (Figure 36). Dans la région des phénols (1175 - 940 cm⁻¹), tous les

échantillons ont enregistré une absorbance très élevée. Les aires de pics calculées ont oscillé entre $13,61 \pm 1$ (" INRA 1301") et $23,17 \pm 0,02$ (" Chaari").

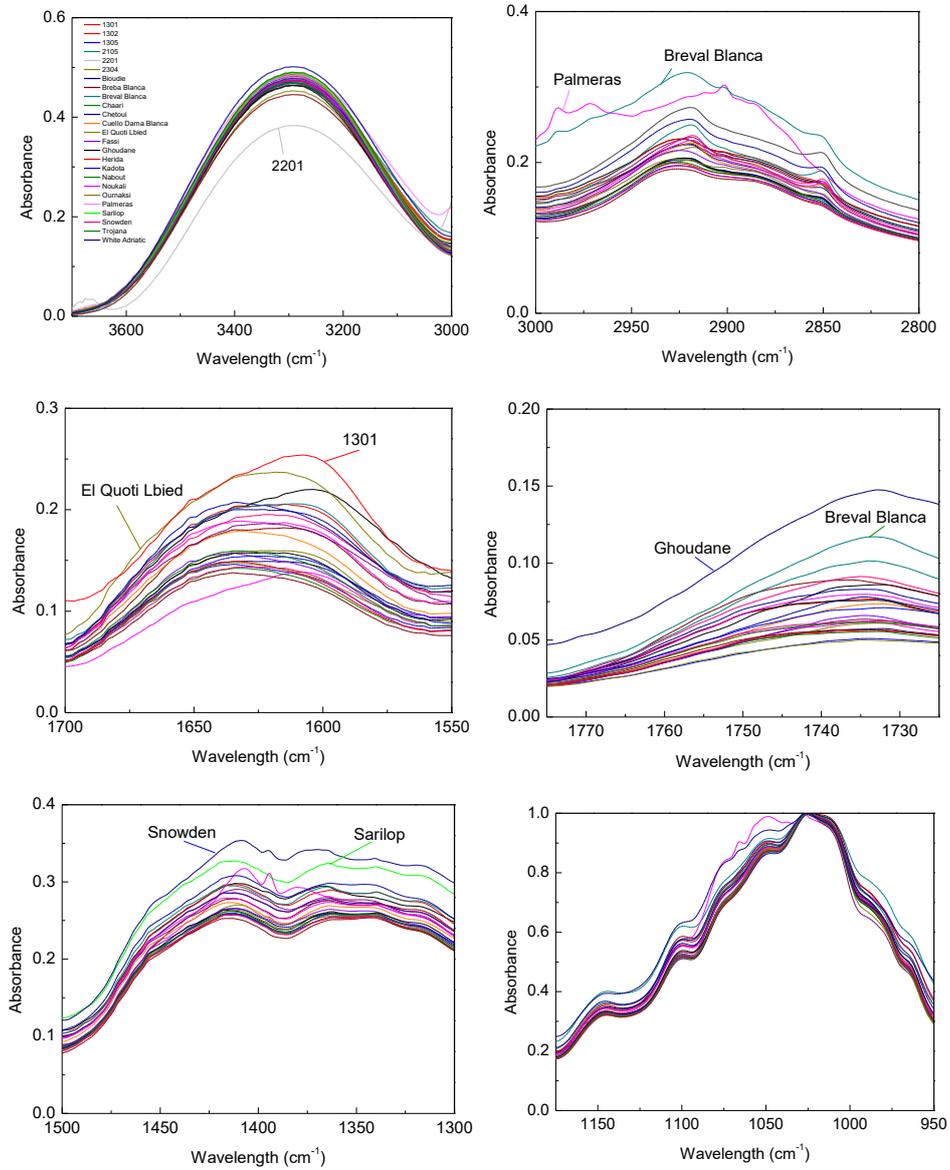


Figure 35. Spectres ATR-FTIR des principales bandes de vibration pour les épidermes. Chaque spectre représente la moyenne de 3 analyses, qui correspondent chacun à l'accumulation de 128 balayages.

Tableau 26. Aires des principales bandes d'absorption dans les spectres ATR-FTIR intégré pour les épidermes des figes. Les valeurs moyennes \pm les erreurs-types de la moyenne sont présentées.

Régions principales de vibration (Epidermes)	3700-3000 cm ⁻¹	3000- 2800 cm ⁻¹	1775- 1725 cm ⁻¹	1700 – 1550 cm ⁻¹	1500 – 1300 cm ⁻¹	1175 – 940 cm ⁻¹
INRA 1301	340.39 \pm 0.8	17.73 \pm 0.05	0.65 \pm 0.01	8.14 \pm 0.03	8.35 \pm 0.02	21.2 \pm 0.03
INRA 1302	325.23 \pm 24.1	15.71 \pm 1.	0.73 \pm 0.03	7.44 \pm 0.4	7.82 \pm 0.5	19.37 \pm 1.5
INRA 1305	385.52 \pm 0.5	17.77 \pm 0.01	0.39 \pm 0.01	6.49 \pm 0.03	9.16 \pm 0.01	22.56 \pm 0
INRA 2105	234.1 \pm 17.3	13.53 \pm 1	0.61 \pm 0.05	5.8 \pm 0.3	5.82 \pm 0.4	13.61 \pm 1
INRA 2201	347.72 \pm 1.6	14.67 \pm 1.6	0.48 \pm 0.07	4.06 \pm 0.43	7.32 \pm 0.7	16.13 \pm 1.6
INRA 2304	375.55 \pm 0.2	18.7 \pm 0.02	0.48 \pm 0.01	6.98 \pm 0.01	9.1 \pm 0.02	22.97 \pm 0.05
Bioudie	272.31 \pm 30.1	18.59 \pm 0.03	0.55 \pm 0.01	6.75 \pm 0	9.2 \pm 0	22.91 \pm 0.03
Breba Blanca	354.96 \pm 1.3	13.38 \pm 1.7	0.84 \pm 0.09	5.59 \pm 0.5	6.77 \pm 0.6	16.97 \pm 1.6
Breval Blanca	378.92 \pm 0.3	19.61 \pm 0.1	0.88 \pm 0.01	7.57 \pm 0.03	8.7 \pm 0.01	21.7 \pm 0.03
Chaari	344.38 \pm 3.2	18.46 \pm 0.01	0.6 \pm 0.01	6.47 \pm 0.01	9.22 \pm 0.01	23.17 \pm 0.02
Chetoui	369.16 \pm 2.3	17.71 \pm 0.2	0.87 \pm 0	7.53 \pm 0.1	8.26 \pm 0.07	20.91 \pm 0.2
Cuello Dama Blanca	362.69 \pm 2.8	18.61 \pm 0.04	0.55 \pm 0.01	7.3 \pm 0.1	8.6 \pm 0.04	21.41 \pm 0.06
El Quoti Lbied	366.75 \pm 0.8	18.22 \pm 0.1	0.51 \pm 0	7.88 \pm 0.1	8.93 \pm 0	21.63 \pm 0
Fassi	367.11 \pm 1.6	19.5 \pm 0.2	0.6 \pm 0.01	6.42 \pm 0.04	8.99 \pm 0.01	21.9 \pm 0.08
Ghoudan	389.8 \pm 0.2	18.63 \pm 0.1	0.91 \pm 0.01	6.68 \pm 0.03	8.96 \pm 0.05	22.72 \pm 0.1
Herida	385.88 \pm 2	17.35 \pm 0.01	0.6 \pm 0	6.71 \pm 0.04	9.19 \pm 0.01	22.9 \pm 0.01
Kadota	317 \pm 3.3	17.15 \pm 0.1	0.61 \pm 0.01	6.83 \pm 0.07	8.9 \pm 0.07	22.88 \pm 0.1
Nabout	361.52 \pm 1.3	18.36 \pm 0.2	0.76 \pm 0	6.72 \pm 0.09	7.67 \pm 0.06	18.76 \pm 0.2
Noukali	383.74 \pm 0.8	18.8 \pm 0.1	0.81 \pm 0.01	7.36 \pm 0.02	8.49 \pm 0.06	21.13 \pm 0.1
Ournaksi	240.03 \pm 0.6	17.34 \pm 0.01	0.44 \pm 0.01	6.62 \pm 0.04	9.3 \pm 0	22.71 \pm 0.03
Palmeras	397.33 \pm 3	19.76 \pm 0.1	0.51 \pm 0.24	4.96 \pm 1.9	6.46 \pm 2.6	14.6 \pm 6.9
Sarilop	297.84 \pm 2.04	17.17 \pm 0.1	0.61 \pm 0.01	6.1 \pm 0.06	9.23 \pm 0.04	22.97 \pm 0.1
Snowden	389.61 \pm 1.1	14.83 \pm 5.6	0.56 \pm 0.25	5.32 \pm 2.1	7.4 \pm 3.1	17.99 \pm 9
Trojana	321.28 \pm 1.8	16.91 \pm 0.02	0.61 \pm 0	7.11 \pm 0.02	8.96 \pm 0	22.4 \pm 0.01
White Adriatic	346.16 \pm 5	17.24 \pm 1.1	0.49 \pm 0.03	6.77 \pm 0.4	7.82 \pm 0.55	18.63 \pm 1.7
Moyenne	346.2 \pm 4.8	17.33 \pm 1.7	0.63 \pm 0.15	6.73 \pm 0.8	8.39 \pm 0.9	20.75 \pm 2.7
Carré moyen ANOVA	6531.6***	8.58***	0.062***	1.9***	2.821***	22.8***

***, indiquent une différence significative au niveau de 0,001

3. Analyse chimiométrique

La combinaison de la spectroscopie ATR-FTIR et les méthodes multivariées telle ACP, permet de réduire la taille des données (multitude de longueur d'ondes) en un nombre limité de paramètres, avec un risque minimal de perte de la variance totale. Ainsi, seules les aires calculées à partir des principales régions de vibration ont été considérées.

Pour chaque facteur, une charge supérieure ou égale à |0,8| a été retenue comme significative. Les pulpes, ont eu une variance totale de 89,74 %, dont la première composante principale (PC1) représente 66,85% de la variabilité totale. Celle-ci s'explique principalement par les fibres, les esters et les phénols. La seconde composante, quant à elle, est liée à la région d'absorbance des protéines et représente 22,9 % de l'inertie totale

(Tableau 27). Le diagramme de dispersion révèle deux grands groupes, opposés en fonction de l'absorbance des protéines (1700 - 1550 cm^{-1}), dont le premier se compose de 20 cultivars, et seulement 4 pour le second. Il convient de noter que le cultivar "Nabout" s'est classé loin des deux groupes, en raison de sa forte intensité d'absorption dans la deuxième et la troisième région de vibration (3000 - 2800 et 1775 - 1725 cm^{-1}).

Pour les épidermes, la variance totale révélée par ACP est d'environ 86 %, dont 67 % sont exprimés par la première composante, fortement liée aux fibres, aux glucides, aux acides aminés libres, aux acides organiques et aux phénols (tableau 27). La deuxième composante (19,6 %) quant à elle, est associée uniquement aux esters. Cinq groupes distincts en sont ressortis (Figure 36). Il convient de noter que l'analyse par spectroscopie ATR-FTIR a permis d'établir une meilleure séparation entre les cultivars par le biais des épidermes. Il serait donc possible de recommander la technique pour un criblage biochimique d'un grand nombre d'échantillons dans les travaux futurs. La sensibilité d'analyse ci-obtenue est comparable aux résultats rapportés pour de nombreuses espèces telles que le pommier (Reid *et al.*, 2005), le grenadier (Vardin *et al.*, 2008), le fraisier (Cassani *et al.*, 2018) et le pêcher (Leopold *et al.*, 2011).

Tableau 27. Cosinus carré des variables étudiées (bandes principales de vibrations) sur les deux premières composantes de l'ACP. Seules les variables ayant une valeur propre supérieure à |0,8| avec une des composantes principales ont été jugées significatives

Régions principales de vibration (longueur d'onde en cm^{-1})	Pulpe		Epiderme	
	PC1 (66.85%)	PC2 (22.89%)	PC1 (67.05%)	PC2 (19.58%)
3700 – 3000 (Fibres)	.947	.043	.955	-.138
3000 – 2800 (Glucides, acides carboxyliques, acides aminés libres et phénoliques)	-.755	.556	.878	.154
1775 – 1725 (Esters)	-.945	-.019	-.052	.933
1700 – 1550 (Protéines)	.412	-.817	.677	.468
1500 – 1300 (Acides organiques contenant des groupes phosphodiester)	.795	.569	.969	-.184
1175 – 940 (Phénols)	.922	.266	.970	-.096
Variance totale (%)		89.74		86.63

Les vecteurs propres supérieurs à |0,8| sont indiqués en gras

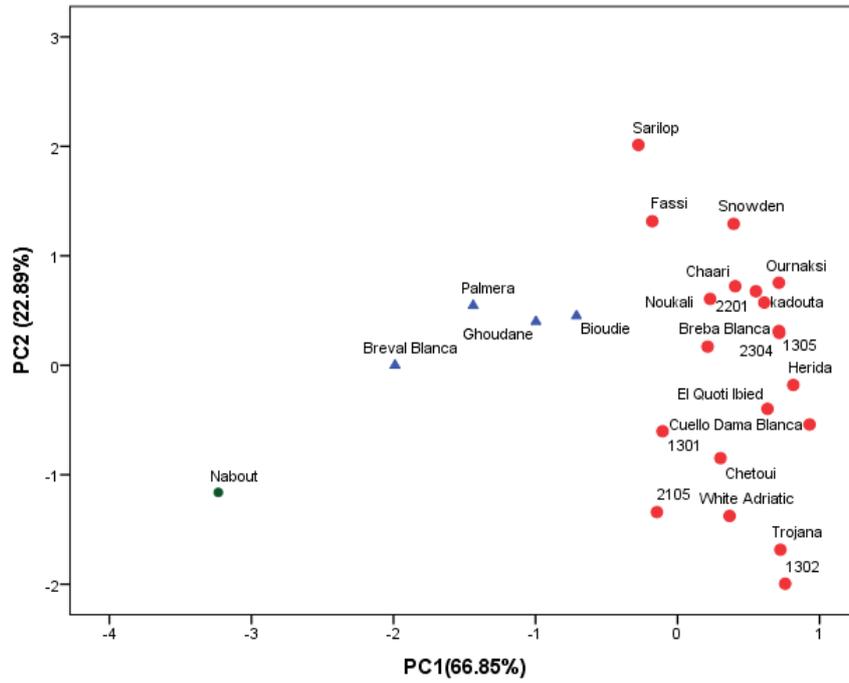


Figure 36. Diagramme de dispersion d'échantillons de pulpes selon les empreintes biochimiques 3700-3000, 3000-2800, 1775-1725, 1700-1550, 1500-1300 et 1175-940 cm^{-1} des spectres ATR-FTIR

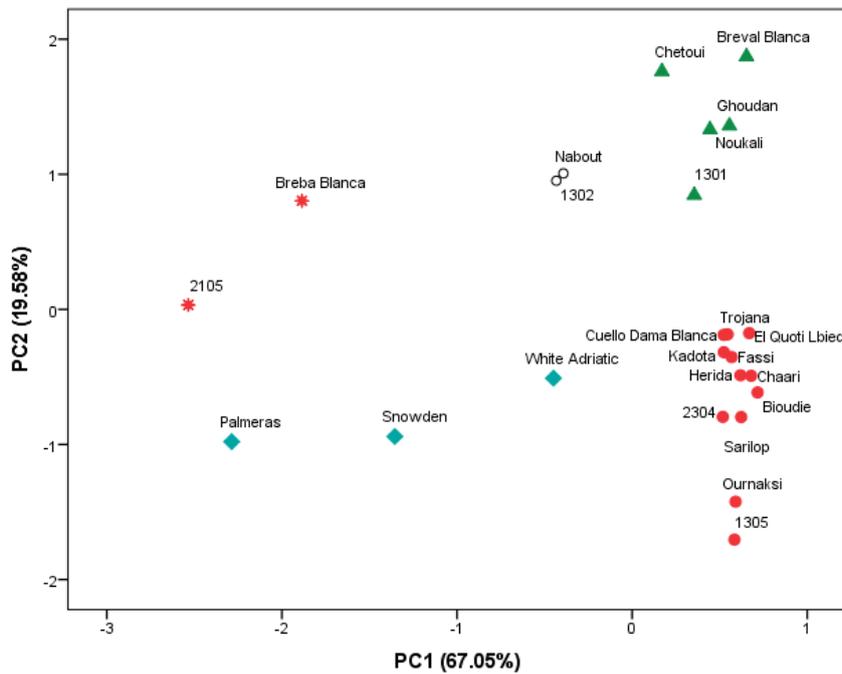


Figure 37. Diagramme de dispersion d'échantillons des épidermes selon les empreintes biochimiques 3700-3000, 3000-2800, 1775-1725, 1700-1550, 1500-1300 et 1175-940 cm^{-1} des spectres ATR-FTIR

II. Détermination des profils phénoliques par HPLC-DAD

1. Profils des composés phénoliques

Des analyses approfondies des polyphénols par HPLC-DAD ont pu identifier plusieurs composés appartenant aux acides phénoliques (dérivés acides hydroxycinnamiques et des acides hydroxybenzoïques) et aux flavonoïdes (flavonols, flavones et anthocyanidines) (Figures 38 et 39). En effet, huit composés phénoliques, notamment : (+)-catéchine, (-)-epicatéchine, acide chlorogénique, quercetin-3-O-rutinoside, quercétine-3-O-glucoside, luteoline-7-O-glucoside, cyanidine-3,5-diglucoside, cyanidine-3-O-rutinoside, ont été détectés au niveau des pulpes. Alors qu'au niveau des pulpes, douze composés ont été isolés (acide gallique, (+)-catéchine, (-)-epicatéchine, acide chlorogénique, quercetin-3-O-rutinoside, quercetin-3-O-glucoside, luteolin-7-O-glucoside, quercétine, apigénine, cyanidine-3,5-diglucoside, cyanidine-3-O-rutinoside, pelargonidin-3-O-rutinoside). Ces substances sont généralement des antioxydants alimentaires vu que les fragments hydroxyle de leur système électronique π conjugué libèrent facilement de l'hydrogène à des espèces réactives d'oxygène. Ces résultats concordent avec ceux rapportés par Viuda-Martos *et al.* (2015) et Milbury *et al.* (2006) sur des figes de deux variétés espagnoles, "Colar" et "Cuello de dama". Les figures 40 et 41 montrent deux chromatogrammes HPLC typiques des pulpes et des épidermes enregistrés à différentes longueurs d'ondes (280, 320, 360 ou 520 nm). Les temps de rétention, les aires des pics, ainsi que leur identification, sont spécifiées dans les tableaux 28 et 29. Les profils phénoliques et les aires des pics identifiés ont varié en fonction des cultivars mais également selon les deux parties du fruit.

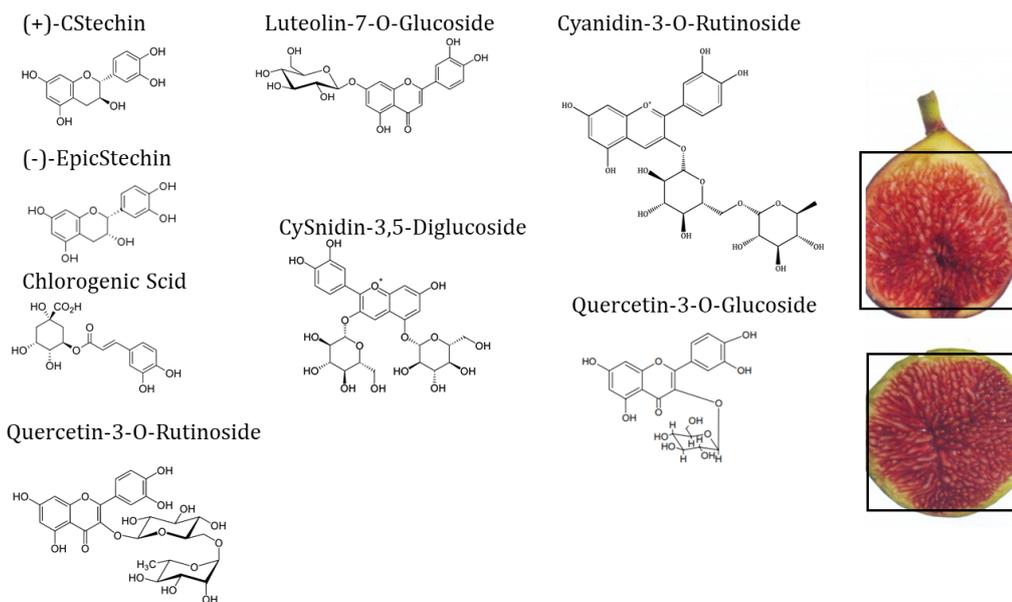


Figure 38. Structures chimiques des principaux composés phénoliques détectés au niveau des pulpes des figes analysées.

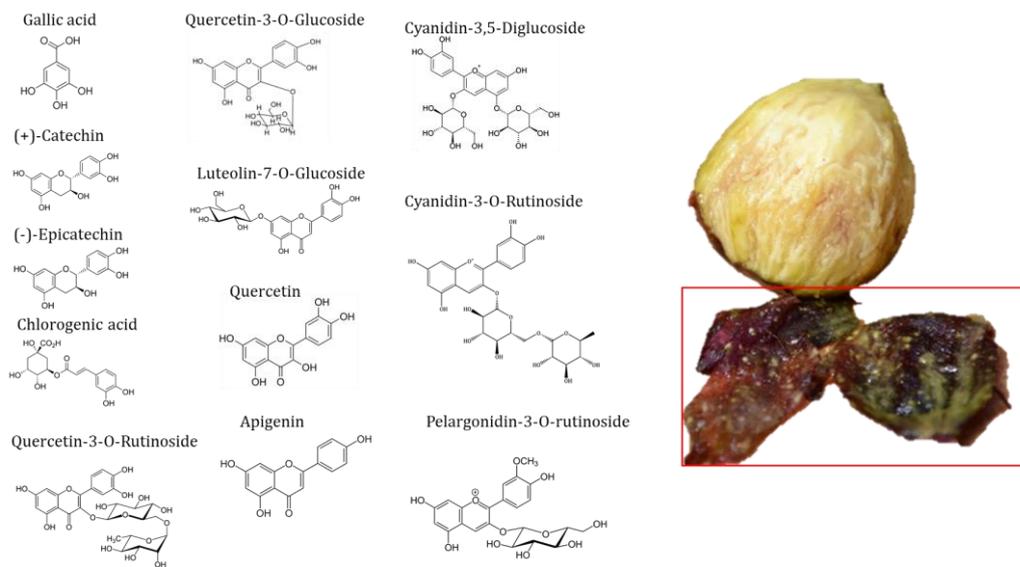


Figure 39. Structures chimiques des principaux composés phénoliques détectés au niveau des épidermes des figes analysées.

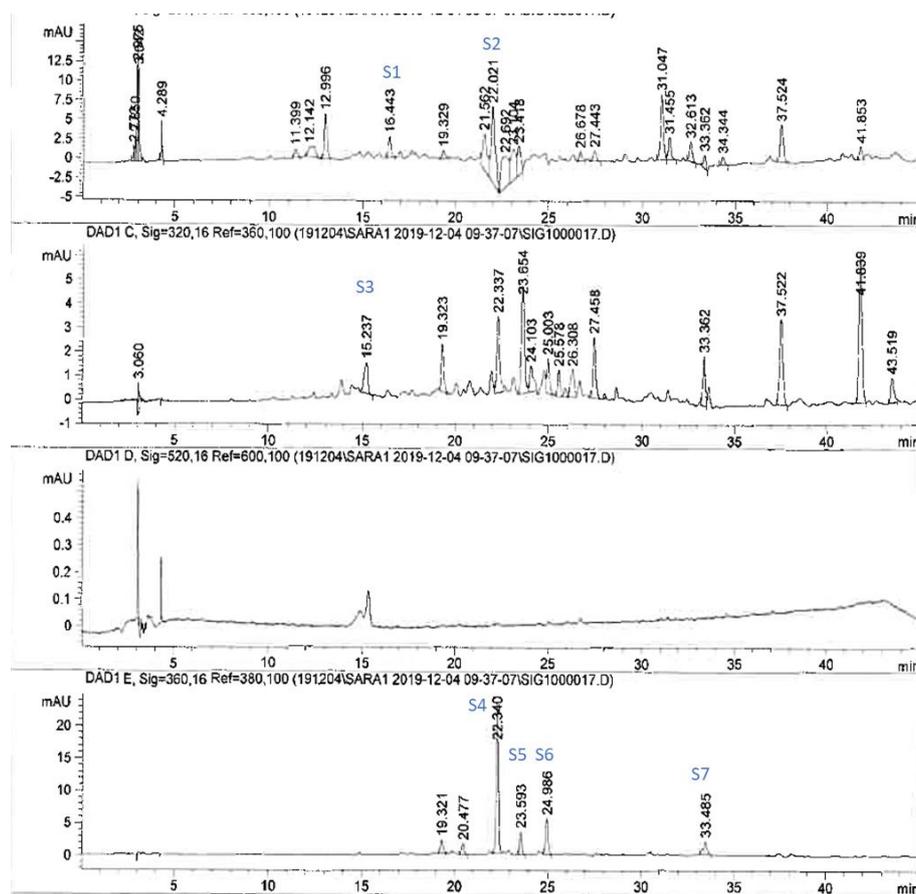


Figure 40. Chromatographe montrant la séparation des phénols dans la pulpe de la figue ; Exemple de la variété " White Adriatic" par CLHP-DAD à 280, 320, 360 ou 520 nm. Pour l'attribution des pics, voir le tableau 24.

Tableau 28. Assignations, temps d'élution, aires des pics détectés au niveau de la pulpe de la figue ; Exemple de la variété " White Adriatic"

Pics (White Adriatique)	Assignation	Temps d'élution (min)	Aire (mAU*s)
S1	(+)-Catéchine	16,443	27,15
S2	(-)-Epicatechine	22,021	59,88
S3	Acide chlorogénique	15,237	17,68
S4	Quercetine-3-O-rutinoside	22,340	201,17
S5	Quercetine-3-O-glucoside	23,593	30,23
S6	Luteoline-7-O-glucoside	24,986	52,73
S7	Quercétine	33,504	12,38

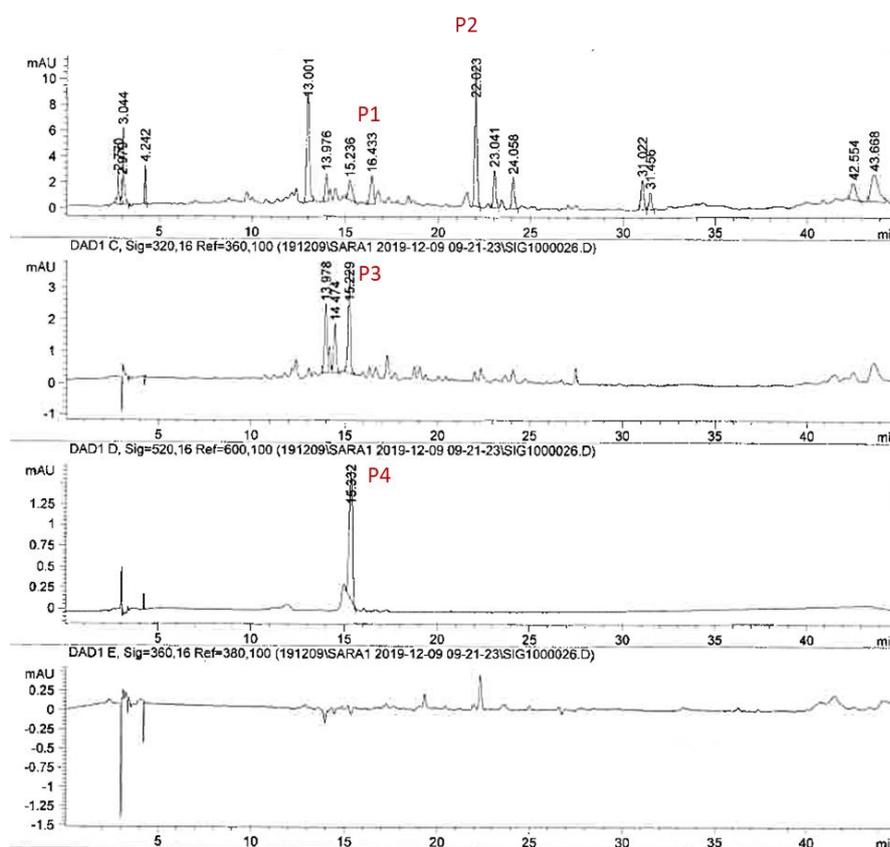


Figure 41. Chromatographe montrant la séparation des phénols dans l'épiderme de la figue ; Exemple du clone local " INRA 1305d" par CLHP-DAD à 280, 320, 360 ou 520 nm. Pour l'attribution des pics, voir le tableau 25.

Tableau 29. Assignations, temps d'élution, aires des pics détectés au niveau de l'épiderme de la figue ; Exemple du clone local " INRA 1305"

Pics (INRA 1305)	Assignation	Temps d'élution (min)	Aire (mAU*s)
P1	(+)-Catéchine	16,433	25,83
P2	(-)-Epicatechine	22,023	92,57
P3	Acid chlorogénique	15,229	10,322
P4	Cyanidine-3-O-rutinoside	15,332	12,55

Le tableau 30 présente les statistiques descriptives des composés phénoliques détectés au niveau des pulpes ($p < 0,0001$), dont (-)-epicatechine et cyanidin-3-O-rutinoside ont été prédominants. Ces composés ont été détectés dans tous les cultivars et à des concentrations très importantes ($5,23 \pm 4,03$ et $9,01 \pm 8,67 \mu\text{g/g MS}$, respectivement.). Cyanidin-3,5-diglucoside, troisième composé prédominant, a varié de 0,81 à $28,45 \mu\text{g/g MS}$ avec une moyenne de $6,06 \pm 6,71 \mu\text{g/g MS}$, suivi de (+)-catéchine et

l'acide chlorogénique, dont les concentrations moyennes ont été respectivement de $1,93 \pm 1,29$ et $1,01 \pm 1,16$ $\mu\text{g/g MS}$. Cependant, luteolin-7-O-glucoside n'a été décelé que dans "Chetoui" et "Palmeras", avec des concentrations spécifiques de $0,75 \pm 0,35$ et $4,47 \pm 0,04$ $\mu\text{g/g MS}$ (Tableau 30).

Tableau 30. Statistiques descriptives et analyse de la variance (ANOVA oneway) des composés phénoliques détectés au niveau des pulpes des échantillons de figes

Composés (Pulpe)	Dominance	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	df	Carré moyen ANOVA	Sig.
(+)-Catechine	19	0,66	6,65	1,93	1,29	18	5,209	<.0001
(-)-Epicatechine	25	1,25	19,06	5,23	4,03	26	46,31	<.0001
Acide chlorogénique	19	0,31	4,84	1,01	1,16	18	4,148	<.0001
Quercetin-3-O-rutinoside	17	0,8	26,85	2,78	6,08	18	102,593	<.0001
Quercetin-3-O-glucoside	6	0,94	4,05	1,84	1,09	5	4,022	<.0001
Luteolin-7-O-glucoside	2	0,35	4,5	2,61	2,05	1	20,78	<.0001
Cyanidin-3,5-diglucoside	24	0,81	28,45	6,06	6,71	25	127,718	<.0001
Cyanidin-3-O-rutinoside	25	0,94	34,43	9,01	8,67	26	213,739	<.0001

Dominance : en termes de cultivars contenant le composé en question ; df : degré de liberté ; sig. : signification Les concentrations (min, max et moy sont exprimées en $\mu\text{g/g}$ de la matière sèche "MS")

Les concentrations moyennes en flavonoïdes et en acides phénoliques sont présentées dans le tableau 31. Le clone local "INRA 2105" a montré le profil phénolique le plus important en combinant les plus grandes teneurs en (+)-catechine, (-)-epicatechine, acide chlorogénique, quercétine-3-O-rutinoside, quercetine-3-O-glucoside, cyanidine-3,5-diglucoside et cyanidine-3-O-rutinoside, et dont les valeurs moyennes propres sont 6,63, 19,05, 4,83, 2,21, 1,45, 20,383 et 28,783 $\mu\text{g/g MS}$. De même, le cultivar "Palmeras" a regroupé les plus grandes concentrations en (+)-catechine, quercetine-3-O-glucoside et luteolin-7-O-glucoside dont les niveaux pris dans cet ordre sont 3,06, 2,18 et 4,47 $\mu\text{g/g MS}$ (tableau 31). Ces résultats sont, généralement en accord avec ceux de Del Caro et Piga (2008), ayant utilisé la même méthode HPLC-DAD sur les variétés Italiennes "Mattalona" et "San Pietro". Ces concentrations, essentiellement en (+)-Catéchine, cyanidine-3-O-rutinoside et luteoline-7-O-glucoside, sont plus élevées en comparaison avec les bananes, les poires et les pommes, toutefois, similaires aux raisins noirs. Le tableau 33 présente plus de détails sur les teneurs en ces composés dans un large éventail de fruits.

Tableau 31. Teneurs en composés phénoliques détectés dans les pulpes des figues étudiées (moyenne \pm écart type). Les teneurs sont exprimées en $\mu\text{g/g}$ de la matière sèche

Cultivars (Pulpe)	(+)- Catéchine	(-)- Epicatechine	Acide chlorogénique	Quercetine-3- O-rutinoside	Quercetine-3- O-glucoside	Luteoline-7- O-glucoside	Cyanidine-3,5- diglucoside	Cyanidine-3- O-rutinoside
Biondie	-	2.15 \pm 0.03	-	-	-	-	0.82 \pm 0.01	1.31 \pm 0.02
Breba Blanca	1,12 \pm 0,04	3,38 \pm 0,05	0,46 \pm 0,01	-	-	-	3,86 \pm 0,02	1,85 \pm 0,04
Breval Blanca	1,71 \pm 0,01	4,79 \pm 0,02	0,33 \pm 0	0,92 \pm 0,07	-	-	5,53 \pm 0,01	8,05 \pm 0,03
Chaari	1,43 \pm 0,01	4,09 \pm 0,02	-	1,23 \pm 0,01	-	-	2,59 \pm 0,01	3,8 \pm 0,02
Chetoui	1 \pm 0,01	7,99 \pm 0,03	1,3 \pm 0,01	26,8 \pm 0,04	4,03 \pm 0,02	0,75 \pm 0,35	6,87 \pm 0,03	11,87 \pm 0,04
Cuello Dama Blanca	-	3,85 \pm 0,01	3,14 \pm 0	1,23 \pm 0,01	0,98 \pm 0,04	-	4,74 \pm 0,03	11,05 \pm 0,03
El Quoti Lbied	-	1,75 \pm 0,01	0,38 \pm 0	-	-	-	3,91 \pm 0,01	7,93 \pm 0,02
Fassi	2,63 \pm 0,02	9,08 \pm 0,02	0,68 \pm 0	1,23 \pm 0,04	-	-	11,93 \pm 0,02	16,94 \pm 0,02
Ghoudan	1,92 \pm 0,01	2,47 \pm 0,04	0,31 \pm 0	1,51 \pm 0,02	1,31 \pm 0,01	-	2,41 \pm 0,02	5,42 \pm 0,01
Herida	0,67 \pm 0,01	2,03 \pm 0,02	-	-	-	-	0,9 \pm 0,03	1,04 \pm 0,01
INRA 1302	2,96 \pm 0,03	9,91 \pm 0,01	1,22 \pm 0,01	1,06 \pm 0,02	-	-	14,74 \pm 0,01	20,37 \pm 0,01
INRA 1305	2,11 \pm 0,02	7,83 \pm 0,02	1,04 \pm 0,01	-	-	-	-	1,52 \pm 0,04
INRA 2105	6,63 \pm 0,02	19,05 \pm 0,02	4,83 \pm 0	2,21 \pm 0,03	1,45 \pm 0,01	-	20,38 \pm 0,03	28,78 \pm 0,02
INRA 2201	1,34 \pm 0,01	1,75 \pm 0,02	0,4 \pm 0,01	-	-	-	4,73 \pm 0,02	10,44 \pm 0,02
INRA 2304	-	1,27 \pm 0	-	0,81 \pm 0	-	-	2,83 \pm 0	5,12 \pm 0
INRA 1301	0,73 \pm 0,01	1,3 \pm 0,03	-	-	-	-	0,83 \pm 0,03	1,39 \pm 0,01
Kadota	1,2 \pm 0,01	8,37 \pm 0,01	0,44 \pm 0	1,02 \pm 0,02	-	-	8,98 \pm 0,03	16,6 \pm 0,02
Nabout	1,5 \pm 0,01	2,52 \pm 0,01	0,36 \pm 0	1,03 \pm 0,03	1,05 \pm 0,01	-	1,11 \pm 0,02	3,03 \pm 0,01
Noukali	1,67 \pm 0,01	4,28 \pm 0,02	0,33 \pm 0,01	1,48 \pm 0,02	-	-	6,15 \pm 0,03	11,1 \pm 0,03
Ouarraksi	1,39 \pm 0,02	1,65 \pm 0,01	0,47 \pm 0,01	1,42 \pm 0,03	-	-	4,11 \pm 0,04	9,68 \pm 0,01
Palmeras	3,06 \pm 0,02	7,23 \pm 0,01	2,07 \pm 0	1,92 \pm 0,02	2,19 \pm 0,02	4,47 \pm 0,04	6,88 \pm 0,01	8,81 \pm 0,01
Sarilop	1,82 \pm 0,01	10,88 \pm 0,04	0,49 \pm 0	0,89 \pm 0,01	-	-	0,93 \pm 0,02	2,25 \pm 0,01
Snowden	-	5,08 \pm 0,01	0,37 \pm 0	-	-	-	0,89 \pm 0,03	1,57 \pm 0,02
Trojana	-	4,15 \pm 0,03	-	1,2 \pm 0,01	-	-	0,84 \pm 0,01	0,96 \pm 0,04
White Adriatic	1,83 \pm 0,02	3,91 \pm 0,02	0,58 \pm 0	1,22 \pm 0,03	-	-	28,43 \pm 0,02	34,42 \pm 0,01

Le tableau 32, illustrant les statistiques descriptives relatives aux composés phénoliques des épidermes, révèle des différences significatives à un niveau de 1% entre tous les cultivars. Il convient de noter que ces concentrations sont, généralement, plus élevées que celles obtenues au niveau des pulpes. Les anthocyanes, particulièrement le cyanidine-3,5-diglucoside et le cyanidine-3-O-rutinoside, ont été les composés prédominants aux concentrations moyennes respectivement de $75,902 \pm 18,76$ et $77,972 \pm 18,95$ $\mu\text{g/g MS}$. Pour les flavonols, les seuls détectés ont été l'(-)-épicatéchine, quercétine-3-O-rutinoside et quercétine-3-O-glucoside. "Chetoui" et "Nabout" sont les uniques cultivars où l'acide gallique et la pelargonidine-3-O-rutinoside ont été détectés, avec les niveaux respectifs de $8,363 \pm 1,88$ et $6,731 \pm 2,019$ $\mu\text{g/g MS}$. Ces résultats s'accordent avec ceux rapportés pour les épidermes de la variété portugaise "Pingo de Mel" par Palmeira *et al.* (2019). Le clone local "INRA 1301" a présenté le profil phénolique le plus intéressant par ses très hautes teneurs pour presque tous les composés phénoliques détectés, particulièrement pour l'(-)-épicatéchine, quercétine-3-O-rutinoside, quercétine-3-O-glucoside, cyanidine-3,5-diglucoside et le cyanidine-3-O-rutinoside (Tableau 33), avec des niveaux propres respectifs de 54,66, 141,08, 35,48, 494,08 et 478,66 $\mu\text{g/g MS}$, respectivement. De même, la variété espagnole "Cuello Dama Blanca" a jumelé de très fortes teneurs en acide chlorogénique, luteoline-7-O-glucoside, quercétine et en apigénine 8,76, 17,9, 59,52 et 4,84 $\mu\text{g/g MS}$, respectivement.

Dans l'étude menée par Palmeira *et al.* (2019), la rutine (quercétine-3-O-rutinoside) a été le composé majoritaire de l'épiderme de la figue, contrairement à nos résultats où les cyanidine-3,5-diglucoside et cyanidine-3-O-rutinoside ont été prédominants. Divers travaux sur l'espèce ont montré que la composition en phénols dépend du génotype, mais aussi fortement influencée par d'autres facteurs dont la fraction analysée (pulpe/épiderme), le stade de maturité et les conditions édapho-climatiques (Harzallah *et al.*, 2016 ; Pereira *et al.*, 2017 ; Arvaniti *et al.*, 2019). Ceci concorde avec les résultats de Solomon *et al.* (2006) ; Del caro et Piga (2008) et Ercisli *et al.* (2012). Finalement, les concentrations en composés phénoliques dans la pulpe représentent en moyenne moins de 20% par rapport à la concentration globale de la figue entière.

Tableau 32. Statistiques descriptives et analyse de la variance (ANOVA oneway) des composés phénoliques détectés au niveau des épiluches des échantillons de figes. Les teneurs sont exprimées en $\mu\text{g/g}$ de la matière sèche

Composés (Epiderme)	Dominance	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	df	Carré moyen	Sig,
Acide gallique	2	2,203	11,293	6,731	2,019	1	122,32	<,0001
(+)-Catéchine	24	0,871	24,064	6,14	0,701	23	109,11	<,0001
(-)-Epicatechine	25	2,614	55,438	17,307	1,489	24	512,57	<,0001
Acide Chlorogenique	24	0,43	10,675	3,161	0,346	23	23,86	<,0001
Quercétine-3-O-Rutinoside	25	5,299	147,418	58,457	4,464	24	4606,85	<,0001
Quercétine-3-O-glucoside	25	2,516	35,58	11,483	0,896	24	185,70	<,0001
Luteoline-7-O-glucoside	22	1,81	18,237	7,672	0,548	21	61,35	<,0001
Quercétine	15	0,846	59,605	7,492	2,305	14	751,51	<,0001
Apigénine	5	1,044	4,914	2,036	0,38	4	7,56	<,0001
Cyanidine-3,5-diglucoside	16	0,725	495,756	75,902	18,766	15	52963,67	<,0001
Cyanidine-3-O-rutinoside	15	0,828	478,895	77,972	18,949	14	50779,57	<,0001
Pelargonidine-3-O-rutinoside	2	3,938	12,665	8,363	1,88	1	105,91	<,0001

Dominance : en termes du nombre de cultivars présentant le composé en question ; df : degré de liberté ; sig, : signification

Les concentrations (min, max et moy sont exprimées en $\mu\text{g/g}$ de la matière sèche "MS")

Tableau 33. Teneurs en composés phénoliques détectés dans les épiluches des figues étudiées (moyenne ± écart type). Les teneurs sont exprimées en µg/g de la matière sèche

Cultivars (Epiderme)	Acide Gallique	(+)-Catechine	(-)-Epicatechine	Acide Chlorogenic	Quercetin-3-O-Rutinoside	Quercetin-3-O-glucoside	Luteolin-7-O-glucoside	Quercetine	Apigénine	Cyanidin-3,5-diglucoside	Cyanidin-3-O-rutinoside	Pelargonidin-3-O-rutinoside
Biondie	-	3.38 ± 0.03	14.05 ± 0.04	3.34 ± 0.01	55.39 ± 0.05	11.66 ± 0.07	7.19 ± 0.06	0.86 ± 0.01	-	-	-	-
Breba Blanca	-	1.74 ± 0.08	6.37 ± 0.09	0.56 ± 0.04	10.98 ± 4.92	6.16 ± 0.12	-	-	-	0.86 ± 0.08	1.06 ± 0.05	-
Breval Blanca	-	5.14 ± 0.03	19.01 ± 0.02	1.66 ± 0.01	65.05 ± 0.03	7.29 ± 0.04	12.43 ± 0.02	-	-	0.76 ± 0.04	0.84 ± 0.01	-
Chaari	-	1.3 ± 0.06	9.84 ± 0.1	0.59 ± 0.03	44.18 ± 0.23	10.07 ± 0.13	5.83 ± 0.08	-	-	3.76 ± 0.08	6.31 ± 0.09	-
Chetoui	11.25 ± 0.05	2.86 ± 0.05	10.21 ± 0.24	2.93 ± 0.02	125.68 ± 0.19	18.66 ± 0.12	8.96 ± 0.06	-	-	0.86 ± 0.05	1.08 ± 0.03	-
Cuello Dama Blanca	-	16.54 ± 0.09	42.35 ± 0.16	8.77 ± 0.06	46.49 ± 0.18	5.32 ± 0.23	17.91 ± 0.31	59.52 ± 0.08	4.84 ± 0.07	-	-	-
El Quoti Lbied	-	2.81 ± 0.01	16.24 ± 0.17	0.49 ± 0.02	28.94 ± 0.19	6.92 ± 0.11	-	1.01 ± 0.04	1.13 ± 0.06	7.03 ± 0.13	-	-
Fassi	-	7.76 ± 0.02	19.01 ± 0.05	4.12 ± 0.01	147.33 ± 0.09	21.06 ± 0.04	15.21 ± 0.04	1 ± 0.02	-	81.08 ± 0.06	83.91 ± 0.07	-
Ghoudan	-	2.35 ± 0.05	16.67 ± 0.03	1.16 ± 0.03	85.87 ± 0.09	21.91 ± 0.08	11.86 ± 0.08	1.4 ± 0.07	-	21.06 ± 0.05	20.17 ± 0.09	-
Herida	-	0.99 ± 0.02	5.12 ± 0.08	0.46 ± 0.02	17.88 ± 0.13	3.39 ± 0.09	2.58 ± 0.04	-	-	-	-	-
INRA 1302	-	4.02 ± 0.04	12.23 ± 0.05	4.28 ± 5.54	53.78 ± 0.09	10.34 ± 0	5.69 ± 0.01	4.45 ± 0.01	-	97.69 ± 0.07	100.32 ± 0.05	-
INRA 1305	-	3.82 ± 0.05	18.96 ± 0.16	8.71 ± 0.08	70.98 ± 0.16	14.67 ± 0.23	-	1.17 ± 0.16	-	21.14 ± 0.31	21.61 ± 0.17	-
INRA 2105	-	23.87 ± 0.19	13.18 ± 0.07	0.67 ± 0.03	38.35 ± 0.15	8.63 ± 0.09	3.82 ± 0.1	5.52 ± 0.06	1.7 ± 0.05	43.03 ± 0.24	40.55 ± 0.18	-
INRA 2201	-	4.67 ± 0.09	24.83 ± 0.34	5.49 ± 0.05	54.77 ± 0.25	13.46 ± 0.12	5.82 ± 0.17	1.2 ± 0.06	-	275.2 ± 0.22	246.86 ± 0.26	4.16 ± 0.23
INRA 2304	-	7.45 ± 0.04	11.07 ± 0.12	0.86 ± 0	64.49 ± 0.04	14.19 ± 0.03	7.26 ± 0.01	3.87 ± 0.02	-	130.12 ± 0.04	131.23 ± 0.04	-
INRA1301	-	14.36 ± 0.26	54.66 ± 0.68	7.81 ± 0.13	141.08 ± 0.19	35.48 ± 0.14	11.5 ± 0.34	2.17 ± 0.09	-	494.08 ± 1.61	478.66 ± 0.37	12.56 ± 0.11
Kadota	-	0.92 ± 0.04	6.21 ± 0.06	1.4 ± 0.04	20.23 ± 0.12	2.56 ± 0.05	3.34 ± 0.03	0.91 ± 0.02	1.11 ± 0.06	-	-	-
Nabout	2.22 ± 0.02	7.01 ± 0.05	9.86 ± 0.11	0.9 ± 0.03	33.78 ± 0.26	6.03 ± 0.09	6.71 ± 0.14	1.46 ± 0.09	-	1.04 ± 0.08	1.15 ± 0.06	-
Noukali	-	6.28 ± 0.09	31.98 ± 0.19	8.39 ± 0.07	112.91 ± 0.27	21.47 ± 0.16	1.86 ± 0.08	-	-	35.89 ± 0.22	34.88 ± 0.42	-
Ouarraksi	-	3.19 ± 0.05	12.42 ± 0.12	3.71 ± 0.03	92.49 ± 0.33	11.22 ± 0.07	8.61 ± 0.08	-	-	0.83 ± 0.06	0.94 ± 0.06	-
Palmeras	-	18.25 ± 0.07	44.22 ± 0.41	4.48 ± 0.02	23.15 ± 0.21	18.31 ± 0.13	15.03 ± 0.11	26.92 ± 0.03	1.4 ± 0.07	-	-	-
Sarilop	-	3.6 ± 0.02	14.91 ± 0.03	2.3 ± 0	41.88 ± 0.04	4.64 ± 0.02	4.3 ± 0.02	-	-	-	-	-
Snowden	-	2.83 ± 0.02	11.52 ± 0.04	2.24 ± 0	49.46 ± 0.04	6.86 ± 0.04	5.33 ± 0.05	-	-	-	-	-
Trojana	-	-	2.67 ± 0.05	-	16.47 ± 0.05	3.25 ± 0.02	2.39 ± 0.05	-	-	-	-	-
White Adriatic	-	2.24 ± 0.04	5.09 ± 0.04	0.57 ± 0.01	19.79 ± 0.12	3.53 ± 0.07	5.17 ± 0.02	0.91 ± 0.02	-	-	-	-

Tableau 34. Concentrations de quelques fruits étudiés dans la littérature en composés phénoliques

Composés	Sous-classe	Concentrations (mg/100g matière sèche)	Références
Acide Gallique	Dérivés des acides hydroxybenzoïques	Pommes [0,0 - 0,662]; Dattes [0,160 - 1,563]; Raisins [0,054 - 3,594]	— Rothwell <i>et al.</i> (2013) — Shinbo <i>et al.</i> (2006) — Duke (2004)
(+)-Catéchine	Flavonols	Amandes [1,279 - 1,279]; Banane [1,342 - 1,342]; Abricots [0,251-3,520]; Kiwi [0,0 - 0,068]; Poires [0,278 - 13,35]	— Rothwell <i>et al.</i> (2013) — Shinbo <i>et al.</i> (2006) — Duke (2004)
(-)-Epicatechine	Flavonols	Poires [0,00035 - 280,086]; Raisins noirs [0,3- 87,0]	— Tsanova-Savova <i>et al.</i> (2005) — Duke (2004)
Acide Chlorogénique	Dérivés des acides hydroxycinnamiques	Pommes [0-2,10]; Amandes [0-42,52]	— Awad <i>et al.</i> (2000) — Takeoka, et Dao (2003)
Quercétine-3-O-Rutinoside	Flavonols	Amandes [0 - 0,259]; Pommes [0,000 - 49,9]; Abricots [0,275 - 1770,0]; Raisins [0,190 - 0,808]	— Rothwell <i>et al.</i> (2013) — Shinbo <i>et al.</i> (2006)
Quercétine-3-O-glucoside	Flavonols	Mertyle [0-0,752]; raisin [0-0,85]	— Duke (2004)
Luteoline-7-O-glucoside	Flavones	Olives [36,9-218,3]; Pomme [0,1-0,3]	— Shinbo <i>et al.</i> (2006)
Quercétine	Flavonols	Pommes [0,000 - 19,360]; Bananes [0,000 - 0,060]; Myrtille [0,600 - 3,040]; Carroube [3,630 - 58,130]; Café [0,000 - 0,050]	— Rothwell <i>et al.</i> (2013)
Apigénine	Flavones	Pistaches [0,000 - 0,003], Fraises [0,000 - 0,010]	— Gebhardt <i>et al.</i> (2008)
Cyanidine-3,5-diglucoside	Anthocyanidines	Grenades [3,140 - 3,390]	— Duke (2004)
Cyanidine-3-O-rutinoside	Anthocyanidines	European plum [33,850 - 33,850] ; Olives [72,352 - 72,352]; Framboise rouge [0,279- 4,949]; Cerise [13,865 - 143,269]	— Shinbo <i>et al.</i> (2006).
Pelargonidine-3-O-rutinoside	Anthocyanidines	Fraises [0,164 - 1,317] ; Cerises [0,000 - 1,244] ; Cassis [0,000 - 2,483]	— Gao et Mazza (1995) — Duke (2004)

2. Analyse en composantes principales (ACP)

Une ACP a été de même effectuée selon le modèle de Pearson, et seules les variables présentant une charge supérieure à $|0,6|$ ont été considérées comme significatives. Pour les pulpes, une variance totale de 71,5% est renfermée par les deux premières composantes (tableau 35). La première étant expliquée par les composés (+)-catéchine ($r=0,846$), (-)-épicatéchine ($r=0,830$), acide chlorogénique ($r=0,834$), cyanidine-3,5-diglucoside ($r=0,772$) et cyanidine-3-O-rutinoside ($r=0,796$). Ces variables représentant plus de 62,5 % des variables étudiées, expliquent plus de 48 % de la variabilité totale observée (tableau 35), voulant signifier que ces attributs présentaient la plus grande variation entre les génotypes. La deuxième composante contribuant dans l'inertie totale 23,1%, a été fortement influencée par quercétin-3-O-rutinoside ($r=0,737$) et quercétine-3-O-glucoside ($r=0,799$). Pour l'épiderme, un niveau de 80,31% de l'inertie totale a été exprimé par les trois premières composantes principales (tableau 36). Ainsi, la première contribuant par 42%, est fortement liée, par ordre d'importance, à (-)-épicatéchine ($r=0,920$), quercétine-3-O-glucoside ($r=0,791$), acide chlorogénique ($r=0,763$), cyanidine-3-O-rutinoside ($r=0,721$), cyanidine-3,5-diglucoside ($r=0,715$), la (+)-catéchine ($r=0,652$), quercétine-3-O-rutinoside ($r=0,644$) et luteolin-7-O-glucoside ($r=0,632$). Ces variables représentent environ 67% de l'ensemble des composés phénoliques détectés dans cette partie du fruit. Par ailleurs, la deuxième composante exprime 25,68% et est représentée seulement par la quercétine ($r=,857$) et l'apigénine ($r=0,889$), au moment où la troisième n'est relatée que par les teneurs en acide gallique ($r=0,832$) avec 12,47% dans la variance totale (Tableau 36).

Tableau 35. Cosinus carré des composés phénoliques détectés dans les pulpes des figes sur les deux premières composantes de l'ACP. Seules les variables ayant une valeur propre supérieure à $|0,6|$ avec une des composantes principales ont été jugées significatives et marquées en gras.

Composés phénoliques de la pulpe	Composantes principales	
	1	2
(+)-Catechine	,846	-,219
(-)-Epicatchine	,830	-,106
Acide chlorogénique	,834	,029
Quercetin-3-O-rutinoside	,362	,737
Quercétine-3-O-glucoside	,555	,799
Luteoline-7-O-glucoside	,320	,531
Cyanidine-3,5-diglucoside	,772	-,415
Cyanidine-3-O-rutinoside	,796	-,390
% de la variance	48,391	23,116
% Cumlatif	48,391	71,506

Tableau 36. Cosinus carré des composés phénoliques détectés dans les épidermes des figues sur les trois premières composantes de l'ACP. Seules les variables ayant une valeur propre supérieure à |0,6| avec une des composantes principales ont été jugées significatives et marqué en gras.

Composés phénoliques de l'épiderme	Composantes principales		
	1	2	3
Acide Gallique	-,011	-,180	,832
(+)-Catéchine	,652	,455	-,103
(-)-Epicatéchine	,920	,183	-,102
Acide chlorogénique	,763	,068	,034
Quercétine-3-O-rutinoside	,644	-,493	,456
Quercétine-3-O-glucoside	,791	-,475	,178
Luteoline-7-O-glucoside	,632	,324	,362
Quercétine	,449	,857	,056
Apigénine	,314	,889	-,009
Cyanidine-3,5-diglucoside	,715	-,483	-,381
Cyanidine-3-O-rutinoside	,721	-,486	-,373
% de la variance	42,040	25,867	12,473
% Cumulatif	42,040	67,907	80,381

3. Diagramme de dispersion (scatter plot)

Les diagrammes de dispersion (scatter plot) déduits des deux premières composantes principales PC1 et PC2 (Figure 42), ont engendré une distribution des cultivars de même allure pour les deux parties du fruit. Ainsi, pour chaque scatter plot, trois cultivars se sont distingués du lot, dont "Palmeras" est commun. Partant des valeurs négatives aux positives du PC1 du premier diagramme, la distribution des génotypes indique une augmentation dans les teneurs en (+)-catéchine, (-)-épicatéchine, acide chlorogénique, cyanidine-3,5-diglucoside et en cyanidine-3-O-rutinoside. Dans le même sens sur PC2, les teneurs en quercétin-3-O-rutinoside et en quercétine-3-O-glucoside augmentent, voulant signifier que les génotypes positivement corrélés à cette fonction présentent des figues riches en quercétine (Figure 42). En ce qui concerne le deuxième diagramme de dispersion, on remarque un décloisonnement des cultivars "Cuello Dama Blanca", "Palmeras" et "INRA 1301" en raison de grandes différences dans les concentrations en catéchine, (-)-épicatéchine, quercétine-3-O-rutinoside, acide chlorogénique et en quercétine. Les autres génotypes ont montré des compositions phénoliques relativement similaires. Ces résultats pourraient être utilisés, par extrapolation, pour informer sur la distribution de ces compositions entre l'ensemble des cultivars de la collection et entre les deux parties du fruit.

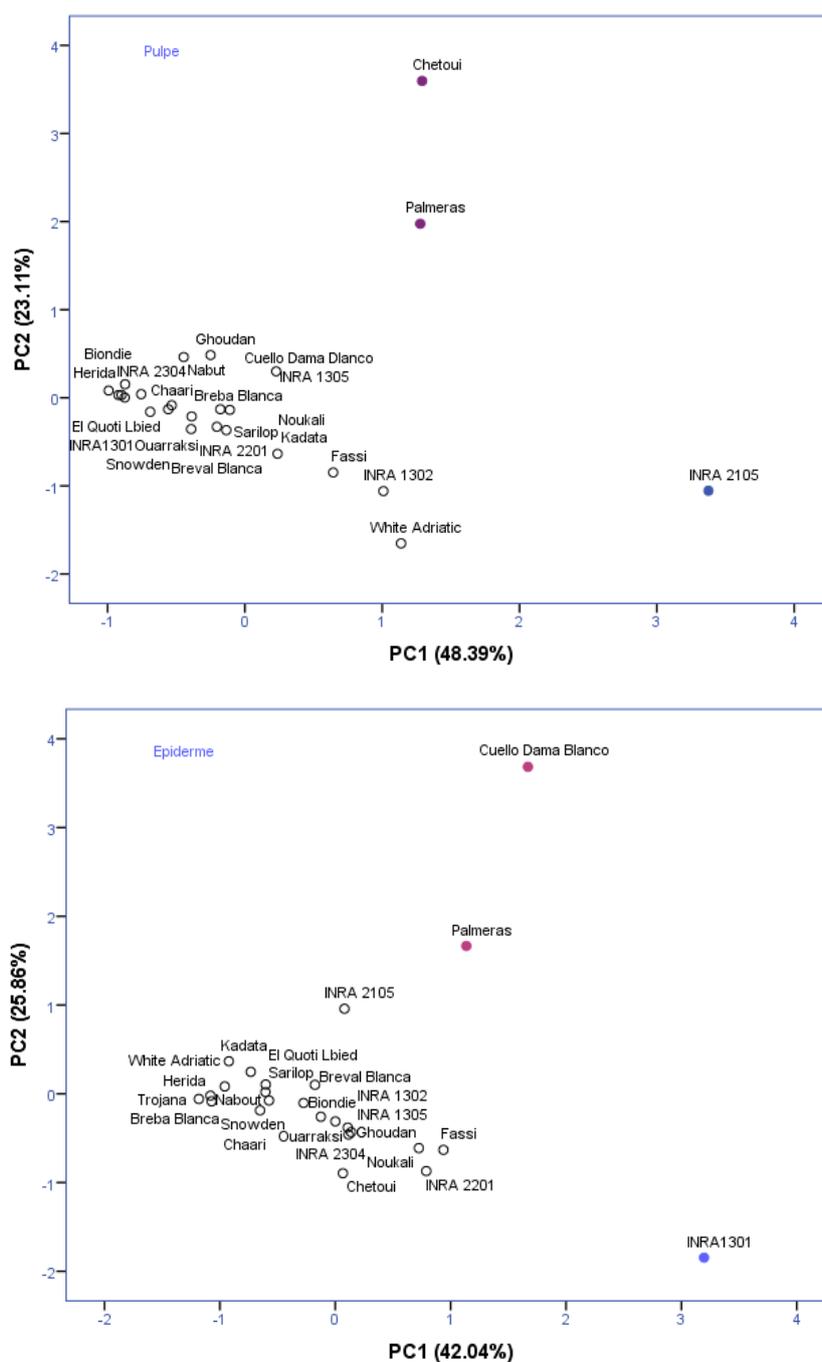


Figure 42. Diagrammes de dispersion des deux premières composantes principales pour les échantillons des pulpes et épidermes des figes étudiées, basé sur les composés phénoliques détectés dans chacune des parties du fruit.

III. Analyse des sucres et des acides organiques chez la figue

L'analyse des sucres et acides organiques est réalisée sur figue entière par HPLC-DAD. 11 cultivars ont été sélectionnés des groupes identifiés à partir du diagramme de dispersion (Scatter plot) généré par analyse ATR-FTIR. Ces cultivars sont, en effet,

répartis dans des groupes contrastés, selon leurs concentrations en sucres totaux exprimés par la première composante de l'ACP (Figure 42).

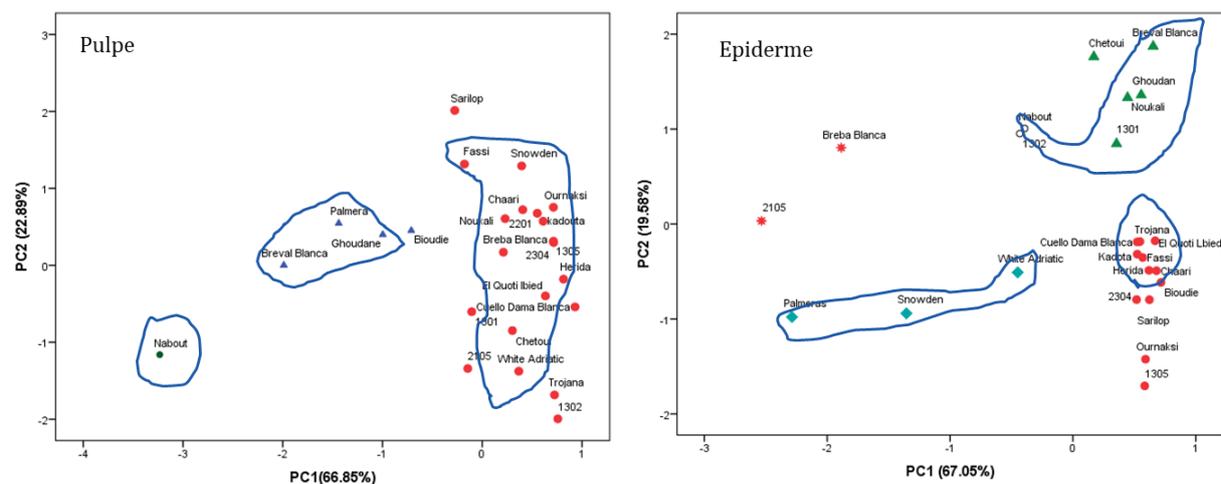


Figure 43. Diagramme de dispersion résultant de l'ACP basé sur l'analyse de l'ATR-FTIR, montrant les groupes auxquels appartiennent les cultivars sélectionnés pour l'analyse des acides organiques et sucres par HPLC-DAD.

1. Profil des Sucres

Les taux de sucre individuels sont présentés dans le tableau 37. Les teneurs en glucose et en fructose dans tous les cultivars ont été voisines, et le rapport glucose/fructose se situe ainsi entre 0,85 et 1,06. Cependant, seules des concentrations mineures de saccharose ont été trouvées. Le glucose a montré une variabilité hautement significative entre les cultivars ($p < 0,001$) et a varié de $5,55 \pm 0,27 \text{ g.kg}^{-1} \text{ MS}$ ("Ghoudan") à $29,94 \pm 0,81 \text{ g.kg}^{-1} \text{ MS}$ ("Breval Blanca"). Les concentrations de fructose par contre, se sont situées entre $6,23 \pm 0,28$ et $28,15 \pm 0,78 \text{ g.kg}^{-1} \text{ MS}$, enregistrées respectivement par "Ghoudan" et "Breval Blanca". Les cultivars "Fassi", "Ghoudan", "Noukali", "Palmeras" et "White Adriatic" ont présenté des taux du fructose supérieurs à ceux du glucose. Ceci est d'une grande importance puisque le fructose implique un goût plus sucré de 80% que le saccharose, alors que le glucose n'est qu'à environ 60% de plus pour cet aspect que le saccharose. Par conséquent, les figures ayant un rapport glucose/fructose plus faible devraient avoir un pouvoir sucrant supérieur à celui des autres cultivars. Globalement, ces résultats sont en harmonie avec Vinson (1999), Melgarejo *et al.* (2001), Melgarejo *et al.* (2003), Veberic *et al.* (2008b), Valero et Serrano (2010) ; Slantar *et al.* (2011) et Souza *et al.* (2013). En outre, de faibles quantités de saccharose ont été détectées et comprises entre $0,86 \pm 0,01$ et $3,66 \pm 0,28 \text{ g.kg}^{-1} \text{ MS}$ (Tableau 37). Ceci pourrait être probablement dû

aux processus anaboliques et à la respiration pendant la maturité des fruits. Elle pourrait également être causée par l'hydrolyse du saccharose en fructose et en glucose pendant la maturation des fruits (Melgarejo *et al.*, 2003 ; Vemmos *et al.*, 2013).

Tableau 37. Teneurs en sucres individuels des figes entières en fonction des cultivars

Cultivars	Saccharose (g. kg ⁻¹ MS)	Glucose (g. kg ⁻¹ MS)	Fructose (g. kg ⁻¹ MS)
Breval Blanca	1,19 ± 0,07f	29,94 ± 0,81a	28,15 ± 0,78a
Cuello Dama Blanca	1,68 ± 0,05e	18,52 ± 2,4de	18,47 ± 2,34d
El Quoti Lbied PS20	1,61 ± 0,25e	7,82 ± 1,05fj	7,57 ± 1,01fj
Fassi	2,03 ± 0,06cd	9,48 ± 0,18f	9,6 ± 0,26f
Ghoudan	0,86 ± 0,01j	5,55 ± 0,27j	6,23 ± 0,28j
Kadota	2,36 ± 0,34c	21,41 ± 4,8cd	20,11 ± 4,5cd
Nabout	2,93 ± 0,14b	18,46 ± 0,62de	17,4 ± 0,51d
Noukali	2,25 ± 0,07c	16 ± 2,16e	17,23 ± 0,86d
Palmeras	1,80 ± 0,31de	23,29 ± 0,35bc	23,55 ± 0,41b
Snowden	1,13 ± 0,04fj	24,68 ± 1,01b	21,85 ± 0,9bc
White Adriatic	3,66 ± 0,28a	10,98 ± 0,1f	12,85 ± 0,61e
Moyenne	1,95 ± 0,15	16,92 ± 1,25	16,64 ± 1,13
Carré moyen ANOVA	2,04 ***	179,61 ***	143,47 ***

Les valeurs moyennes ± les écarts types sont présentées. Les différentes lettres (a-j) dans les colonnes représentent des différences statistiquement significatives entre les cultivars à p<0,05. SUCR : Saccharose ; GLUC : Glucose et FRUC : Fructose.

** ; *** indiquent une différence significative au niveau de 0,01 et 0,001 respectivement.

2. Profil d'acides organiques

La teneur en acides organiques a montré des différences importantes entre les cultivars (figure 44). L'acide malique, prédominant dans tous les échantillons, a généralement enregistré des niveaux estimés au double, voire au triple de ceux de l'acide citrique. Le cultivar "Palmeras" a présenté la haute concentration en acide malique (4,99 ± 0,2 g.kg⁻¹), suivi de "White Adriatic", "Cuello Dama Blanca" et "Breval Blanca" dont les moyennes ont été de 3,74, 2,6 et 2,55 g.kg⁻¹ MS, respectivement (Figure 44). L'acide citrique, a varié dans un intervalle étroit entre 1 ± 0,02 ("White Adriatic") à 0,31 ± 0,04 ("El Quoti Lbied PS20") (Figure 43). Ces résultats sont en accord avec ceux de Colaric *et al.* (2005), Veberic *et al.* (2008a), Pande et Akoh (2010) et Pereira *et al.* (2017). Selon les mêmes auteurs, l'acide malique et l'acide citrique ont été identifiés comme les principaux acides organiques dans les figes, néanmoins, en très faibles quantités pour les acides succinique, fumarique, shikimique et oxalique. La douceur des fruits est, outre les sucres, principalement tributaire de certains acides, tels l'acide citrique et l'acide shikimique.

Dans les pêches, même en petites quantités, l'acide citrique peut augmenter l'acidité du fruit par rapport à l'acide malique et donc influencer le goût des fruits et diminuer effectivement leur douceur (Colaric *et al.*, 2005). Par rapport à certains fruits comme les cerises, les pêches ou les abricots, les concentrations en acide citrique et acide malique sont généralement faibles au niveau de la figue (Colaric *et al.*, 2005 ; Kafkas *et al.*, 2018 ; Serradilla *et al.*, 2011).

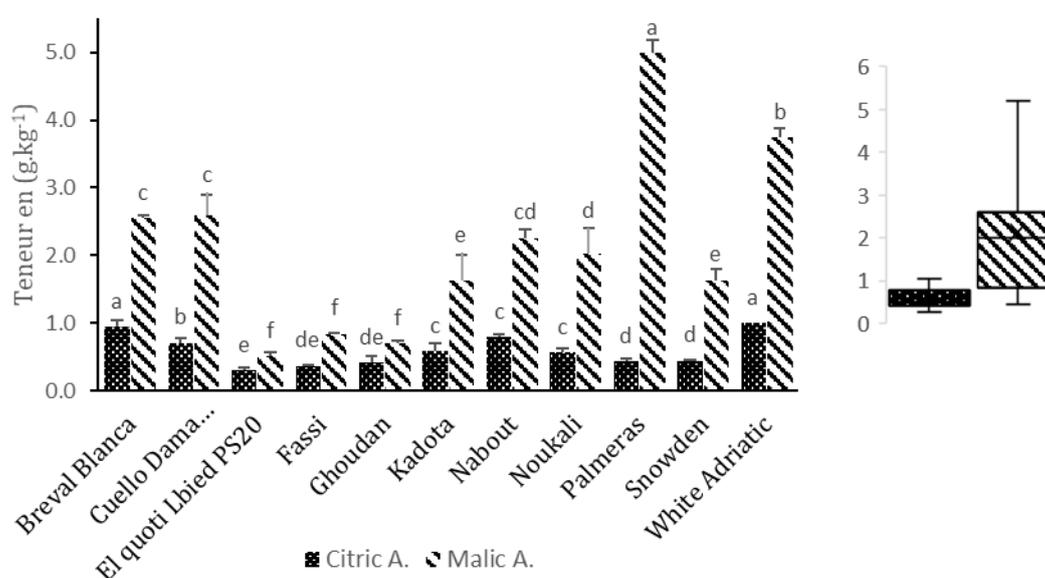


Figure 44. Teneur en acides organiques ($g\ kg^{-1}$) exprimées en moyennes \pm l'écart-type. Les différences statistiquement significatives ($p < 0,05$) entre les cultivars sont présentées sur les barres d'erreur (a-f). Des diagrammes en boîtes à moustache ont été utilisés pour montrer la distribution des données. Citric A. = acide citrique et Malic A. = Acide malique

3. Rapport sucres/acides organiques

Le rapport sucres/acides organiques est un facteur important de la qualité de la figue (Vemmos *et al.*, 2013). Plus il est élevé, plus les fruits sont sucrés, et inversement (Colaric *et al.*, 2005). En effet, ce rapport a montré des différences significatives à un niveau de $p < 0,01$. Ce rapport a été plus élevé chez la variété "Snowden" ($20 \pm 1,05$) dotée de la plus forte teneur en sucres et un niveau moyen d'acides organiques. Le cultivar "El Quoti Lbied" ($20,7 \pm 0,28$) quant à lui, a enregistré la plus faible teneur en acides organiques et un niveau optimal de sucres totaux, et donc un rapport élevé. Cependant, les valeurs les plus faibles ont été trouvées chez les cultivars "Palmeras" ($8,96 \pm 0,47$), "Ghoudan" ($11,45 \pm 0,86$) et "Cuello Dama Blanca" ($11,67 \pm 0,17$) (Figure 45).

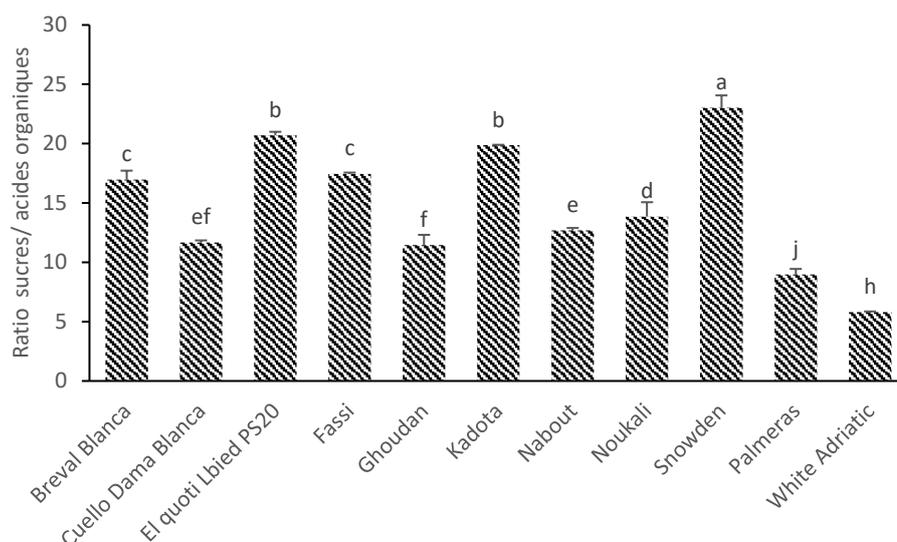


Figure 45. Rapport sucres/acides organiques dans les 11 cultivars de figuier étudiés. Les valeurs moyennes \pm l'écart-type sont présentées ; les différences statistiquement significatives entre les cultivars sont présentées sur les barres d'erreur (a-h).

IV. Conclusion

Les méthodes classiques d'évaluation de la qualité biochimique des fruits, consommatrices d'intrants chimiques et de temps, ne seraient, généralement pas commodes pour des fins de criblage scientifique (Rodriguez-Saona et allendorf, 2011). Toutefois, combinées à des méthodes statistiques, plusieurs alternatives telles ATR-FTIR et HPLC-DAD fournissent un potentiel considérable de discrimination. Pour ces deux techniques, l'analyse des propriétés biochimiques des épidermes a révélé un pouvoir de discrimination largement important par rapport à la pulpe. Ceci pourrait être dû aux composés clés de la qualité majoritairement présents dans les épidermes, tels les pigments, les vitamines et les composés antioxydants incarnant un niveau important dans la variabilité. Dans l'ensemble, l'analyse des spectres IR a révélé cinq empreintes biochimiques, dont la région de vibration correspondant aux polyphénols a montré la plus grande absorbance. Dans cette région, l'(-)-épicatéchine, l'acide chlorogénique, le cyanidine-3,5-diglucoside, le cyanidine-3-O-rutinoside, la quercétine et l'apigénine ont été les composés phénoliques les plus discriminants entre les cultivars à la fois pour l'épiderme et la pulpe. En revanche, sur les figes entières, l'acide malique était le principal acide organique. Le fructose et le glucose ont montré des teneurs très proches chez tous les cultivars, alors que seules des faibles quantités de saccharose y ont été détectées.

Chapitre. II

Valorisation post-récolte des figes : cinétique des isothermes, modélisation de séchage et étude biochimique de l'huile des graines

Chapitre II. 1. Cinétique et modélisation des isothermes de sorption et propriétés thermodynamiques

1. Isothermes de sorption d'humidité

Le tableau 35 présente les données des isothermes de désorption et d'adsorption de l'eau pour "Sarilop" et "Kadota" à différentes températures, qui ont montré un effet significatif pour toute la gamme d' a_w . A température constante, le taux d'humidité d'équilibre (THE) augmente proportionnellement avec l'activité de l'eau (Figure 46). Ceci est probablement lié à l'état actif élevé des molécules d'eau quand la température est élevée, ce qui affaiblit leur force d'attraction (Bushuk et Winkler, 1957). Les isothermes de sorption ont présenté une courbe caractéristique en forme de 'S', typique de nombreux isothermes de sorption des fruits tels le kiwi, les cerises et les pommes (Figure 47) (Moraes *et al.*, 2008 ; kizmaz *et al.*, 2019). Ces résultats signifient que la sorption chez la fige présente une forme sigmoïdale, caractéristique d'un isotherme de type II (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002). Un comportement similaire a été observé chez les piments rouges (Kaleemullah et Kailappan, 2004), les épiluches et les feuilles d'orange (Bejar *et al.*, 2012) et les bananes (Yan *et al.*, 2008). A une activité constante de l'eau, la THE de désorption est supérieure à celle d'adsorption, qualifiant ainsi le phénomène d'hystérésis souvent rencontré chez un large éventail d'aliments. En outre, il a été observé que l'amplitude de l'hystérésis était, généralement, plus visible à une fourchette d' a_w entre 0,4 et 0,8. La boucle d'hystérésis est plus large à des fortes températures, et pourrait être dûe aux concentrations élevées des sucres n'ayant pas été totalement dissouts (Tsami *et al.*, 1990). Le même phénomène a été observé par Wang et Brennan (1991) chez la pomme de terre.

Selon Nguyen *et al.* (2018), il n'y a pas une seule explication de l'hystérésis chez les aliments, puisque ces derniers sont complexes et contiennent divers constituants, qui absorbent l'eau et interagissent entre eux. La théorie la plus privilégiée pour expliquer cette particularité thermodynamique, associe l'hystérésis au potentiel de réarrangements

structuraux et conformationnels des composants alimentaires. Ainsi, lorsque l'eau migre hors des capillaires de la matrice, lors de la désorption, les extrémités étroites des pores de surface emprisonnent et retiennent l'humidité à l'intérieur sous l'activité de l'eau, de sorte que la teneur en humidité augmente à des faibles valeurs d' a_w (Yan *et al.*, 2008). Lors de l'adsorption, les solutés sont dissouts, ce qui augmente la tension superficielle et réduit l'activité de l'eau. Le gonflement des protéines et des glucides pendant l'adsorption de l'humidité peut également entraîner une hystérésis. Par conséquent, les sites polaires, une fois obscurcis pendant le séchage, interagissent avec l'eau et forment des liaisons hydrogènes. D'autre part, pendant la désorption, certains solutés peuvent sursaturer la surface sous leur activité de cristallisation, ce qui entraîne une plus grande rétention d'eau à un faible d' a_w (Iglesias et Chirife, 1976). Bell et Labuza (2000) ont signalé que les aliments riches en sucre présentent souvent ce phénomène.

Dans les systèmes alimentaires, plusieurs formes de boucles d'hystérésis ont été observées. Wolf *et al.* (1972) et Rouquerol *et al.* (2013) ont signalé de grandes différences dans la forme, l'ampleur et l'étendue de l'hystérésis dans des aliments déshydratés, dont les caractéristiques varient selon le type, la nature et la température des aliments (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002). L'isotherme de sorption de l'échantillon de figues est classé de type (II) avec une boucle d'hystérésis H3 classée par l'Union internationale de la chimie pure et appliquée (International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)).

Tableau 38. Taux d'humidité d'équilibre d'adsorption et de désorption obtenus à différentes activités et températures de l'eau

	Isotherme de sorption à								
	30°C			40°C			50°C		
	a_w	Sarilop	Kadota	a_w	Sarilop	Kadota	a_w	Sarilop	Kadota
Désorption	0,0738	18,00	17,45	0,0626	14,03	14,88	0,0572	8,53	12,22
	0,3238	30,25	31,82	0,3159	23,12	27,41	0,3054	17,49	24,23
	0,4317	36,08	37,71	0,423	27,99	34,39	0,4091	22,46	31,98
	0,7275	37,13	46,95	0,71	32,69	47,19	0,6904	29,85	40,08
	0,8362	42,48	62,63	0,8232	38,43	57,48	0,812	35,92	50,21
	0,898	66,29	70,28	0,891	63,26	66,84	0,8823	59,61	63,87
Adsorption	0,0738	12,38	15,74	0,0626	11,84	12,67	0,0572	7,69	9,22
	0,3238	27,74	30,72	0,3159	19,40	25,63	0,3054	13,03	18,56
	0,4317	31,28	35,89	0,423	24,10	31,51	0,4091	19,39	27,78
	0,7275	35,88	54,28	0,71	28,53	43,15	0,6904	25,27	38,18
	0,8362	38,26	60,96	0,8232	36,33	52,43	0,812	31,64	45,61
	0,898	63,98	67,77	0,891	60,94	56,96	0,8823	56,43	52,10

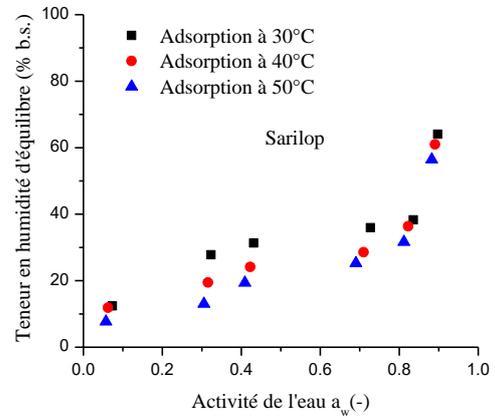
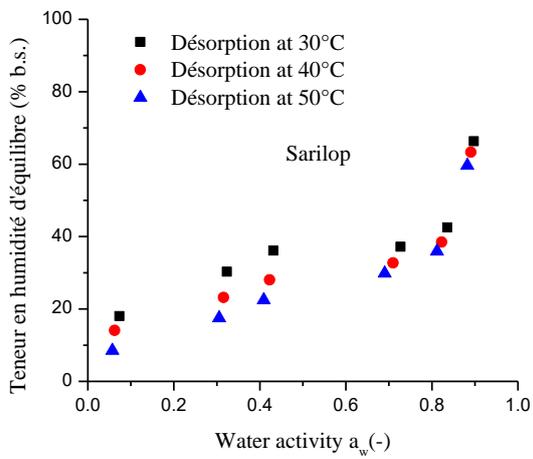
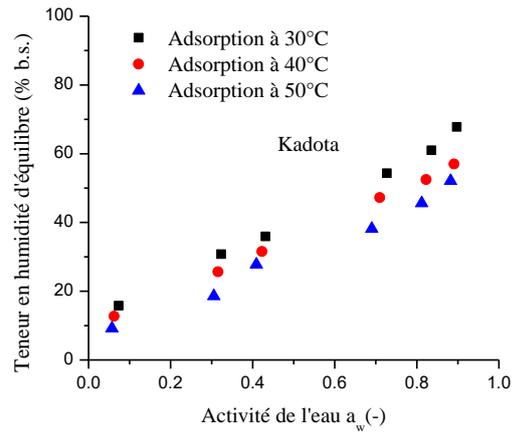
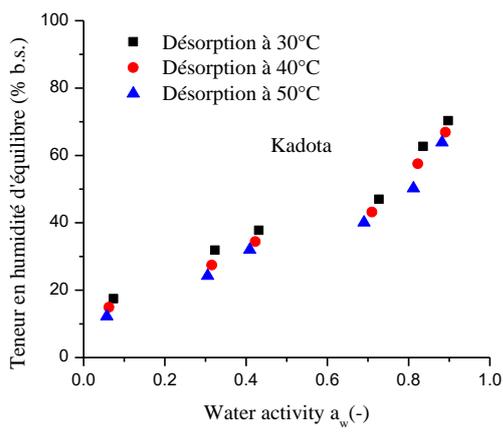


Figure 46. Isothermes de désorption et d'adsorption des deux variétés du figuier à 30, 40 et 50 °C

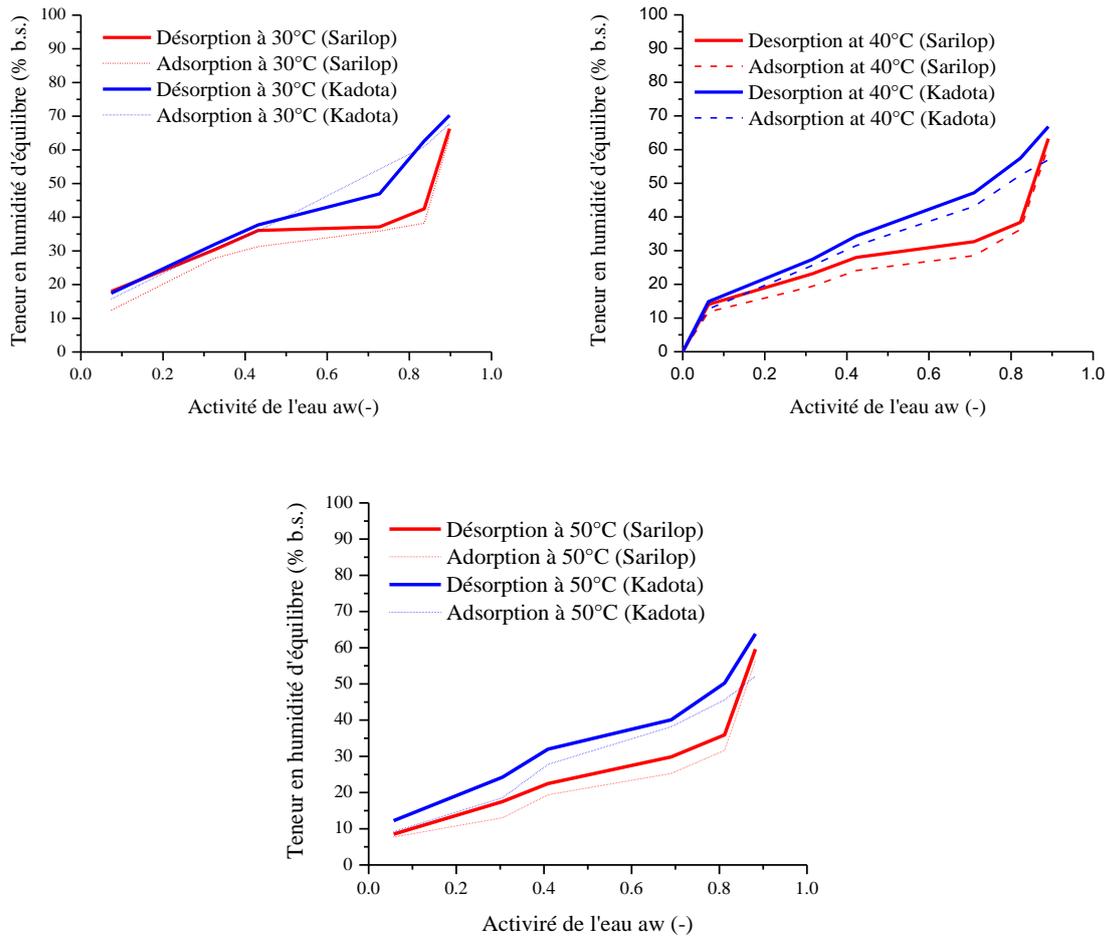


Figure 47. Propriétés hygroscopiques à 30, 40 et 50°C pour les deux variétés du figuier

2. Ajustement des modèles de sorption aux données expérimentales

Les résultats de la régression non linéaire lors de l'ajustement des données de sorption aux équations mathématiques sont présentés au tableau 39. Le choix du modèle a été basé sur le coefficient de corrélation (R^2) et l'erreur standard (Standard Error (SE)). Tous les modèles, ont exprimé un R^2 supérieur à 0,95. Lorsque SE a été prise en compte, il a été constaté que ces modèles étaient en accord avec les données expérimentales à l'exception du GAB qui a montré une erreur supérieure à 5, à la fois pour la désorption et l'adsorption. Les modèles Enderby et Peleg ont révélé la meilleure prédiction, respectivement pour "Sarilop" et "Kadota". Ces modèles ont enregistré les plus hautes valeurs pour R^2 (0,9974 et 0,9984, respectivement) et les plus faibles pour SE (1,8586 et 1,6849, respectivement) (tableau 39). Les mêmes modèles ont montré la meilleure prédiction des isothermes d'adsorption pour les deux variétés. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par Abdenouri *et al.* (2010), qui ont trouvé qu'Enderby et

Peleg avaient les meilleurs estimateurs pour prévoir la teneur en humidité à l'équilibre de la poudre de lait. Toutefois, García-Pérez *et al.* (2008) ont signalé que le modèle de GAB montrait la meilleure prédiction des isothermes des épiluches de citron. Bien que de nombreux modèles mathématiques aient été utilisés pour plusieurs aliments, aucun d'entre eux ne permet de prédire avec précision les isothermes d'humidité dans toute la gamme des activités de l'eau, et pour toutes les matrices alimentaires (Bell et Labuza, 2000 ; Chowdhury *et al.*, 2006).

Tableau 39. Paramètres estimés des modèles utilisés pour les variétés du figuier à différentes températures des essais de désorption et d'adsorption

	Modèle	Température (°C)	Sarilop		Kadota	
			R ²	SE	R ²	SE
Désorption	Enderby	30	0,9967	2,0369	0,9993	1,1769
		40	0,9978	1,7503	0,9479	9,6996
		50	0,9977	1,7887	0,9907	4,8067
		Moyenne	0,9974	1,8586	0,9793	5,2277
	GAB	30	0,909	8,6256	0,9875	4,1133
		40	0,9565	6,3616	0,9853	4,2406
		50	0,9965	1,7821	0,9977	1,9242
		Moyenne	0,954	5,5897	0,9901	3,4260
	Peleg	30	0,9948	2,5906	0,9992	1,2059
		40	0,999	1,1335	0,9971	2,2954
		50	0,9961	2,2915	0,999	1,5535
		Moyenne	0,9966	2,0052	0,9984	1,6849
Adsorption	Enderby	30	0,9999	0,3053	0,9996	0,9012
		40	0,9983	1,58	0,9644	6,9862
		50	0,9962	2,1013	0,9996	0,8407
		Moyenne	0,9981	1,3288	0,9878	2,9093
	GAB	30	0,9091	9,0919	0,9853	4,4045
		40	0,9715	5,2594	0,981	4,1789
		50	0,9935	2,2367	0,9975	1,6561
		Moyenne	0,9580	5,5293	0,9879	3,4131
	Peleg	30	0,9966	2,1972	0,9996	0,9197
		40	0,999	1,2234	0,9962	2,2774
		50	0,9952	2,3607	0,9989	1,3419
		Moyenne	0,9969	1,9271	0,9982	1,513

3. Propriétés thermodynamiques

La chaleur isostérique nette (q_{st}) représente l'énergie nécessaire pour libérer les molécules d'eau liée, à la température du système (Tunç et Duman, 2007). Par convention, lorsque la chaleur est libérée lors de l'adsorption, la q_{st} est considérée comme une quantité positive d'énergie dégagée, alors qu'elle est négative lors de la désorption où la chaleur est absorbée pour décomposer les forces intermoléculaires entre la vapeur d'eau et la surface de l'adsorbant (Moraes *et al.*, 2008). Par conséquent, la chaleur de sorption est considérée comme une indication des forces d'attraction intermoléculaires entre les sites de sorption et la vapeur d'eau (Tunç et Duman, 2007).

La chaleur isostérique nette de sorption des figes diminue considérablement lorsque la teneur en humidité d'équilibre augmente. Ce changement illustre la forte liaison entre l'eau et les échantillons, qui deviennent négligeable à forte teneur en humidité d'équilibre. En effet, plus l'échantillon est riche en eau, plus l'énergie de liaison entre les molécules d'eau s'affaiblit, comme celle des molécules d'eau à l'état liquide. Par contre, lorsque le taux d'humidité est faible, l'énergie reliant les molécules d'eau aux sites de sorption primaires devient supérieure à l'énergie qui lie les molécules d'eau entre elles (Moraes *et al.*, 2008).

La chaleur nécessaire à la désorption de la fige a été supérieure à celle nécessaire au processus d'adsorption. Les résultats ont montré une différence dans la force de liaison des molécules entre les deux variétés. Ainsi, l'énergie nécessaire aux processus de désorption et d'adsorption de "Sarilop" est environ le double de celle de la variété "kadota". En désorption, "Kadota" nécessite 72 KJ/mol tandis que "Sarilop" adsorbe 37 KJ/mol de chaleur pour briser les liaisons entre les molécules d'eau et les sites de sorption à la surface des échantillons (Figure 48). La chaleur isostérique nette de sorption dans les échantillons étudiés a été exprimée par une fonction polynomiale de troisième degré, qui se définit comme $X_{eq}=7,052+109,3aw-184aw^2+148,3aw^3$ pour "Kadota" et $X_{eq}=0.728+196.4aw-504,7aw^2+400,2aw^3$ pour "Sarilop" (Figure 49). Les valeurs ajustées de R^2 étaient respectivement de 0.93 et 0.88. Les valeurs de l'activité de l'eau optimale de conservation de l'eau ont été estimées à 0,41 pour "Kadota" et 0,42 pour "Sarilop" (Figure 49).

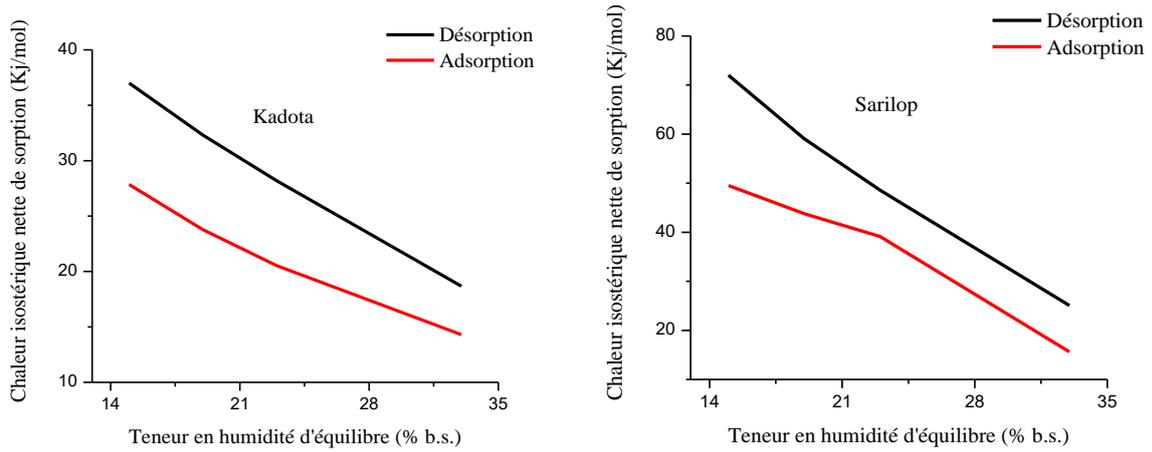


Figure 48. Chaleur isostérique nette des isothermes pour les variétés du figuier étudiées en fonction de leurs teneurs en eau à l'équilibre

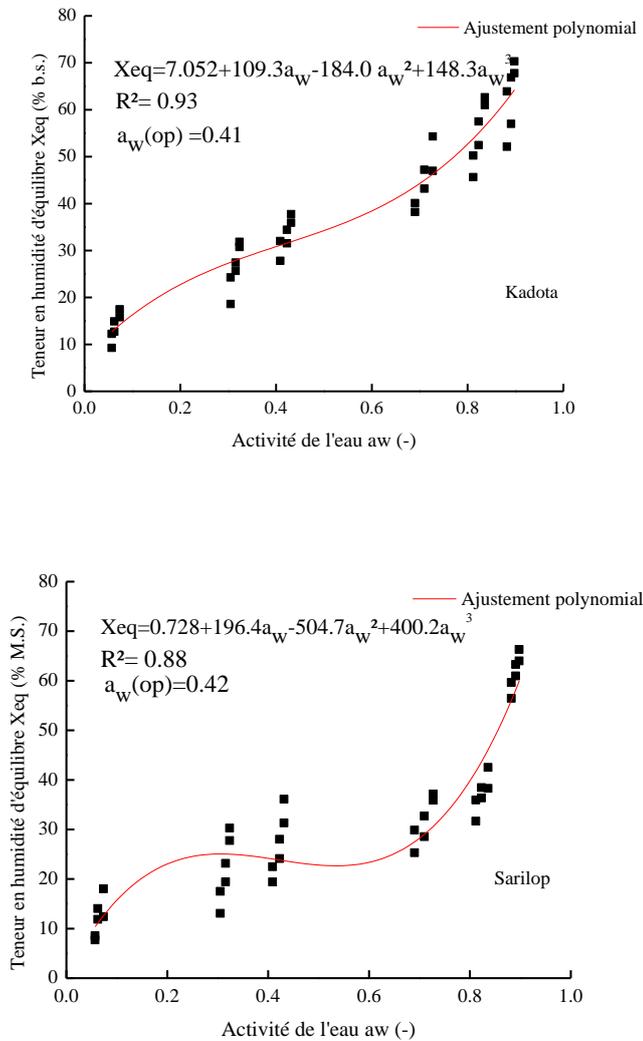


Figure 49. Détermination de l'activité de l'eau optimale dans les échantillons de figues en utilisant équation polynomiale de troisième degré

4. Entropie différentielle de sorption

La figure 50 présente l'entropie différentielle de la sorption en fonction de la teneur en humidité d'équilibre. Une fois de plus, les données d'entropie montrent une forte dépendance à l'humidité. Ainsi, l'entropie différentielle diminue à mesure que le taux d'humidité augmente. Cette tendance a été signalée chez la variété du pommier "Granny Smith" et l'huile d'orange encapsulée (Nunes et Rotstein, 1991 ; Beristain *et al.*, 2002). La variété "Sarilop" a présenté les valeurs d'entropie différentielle les plus élevées, soit 205 et 145 Kj/mol, respectivement pour la désorption et l'adsorption. Ces niveaux sont l'équivalent de ceux enregistrés par "Kadota" (100 et 67, respectivement pour la désorption et l'adsorption). Selon Madamba *et al.* (1996), l'entropie différentielle d'un matériau est proportionnelle au nombre de sites de sorption disponibles à un niveau donné d'énergie. Généralement, l'étude des propriétés thermodynamiques est très importante puisqu'elle génère de nouvelles données sur l'association entre les molécules de l'eau dans un système (Simal *et al.*, 2007).

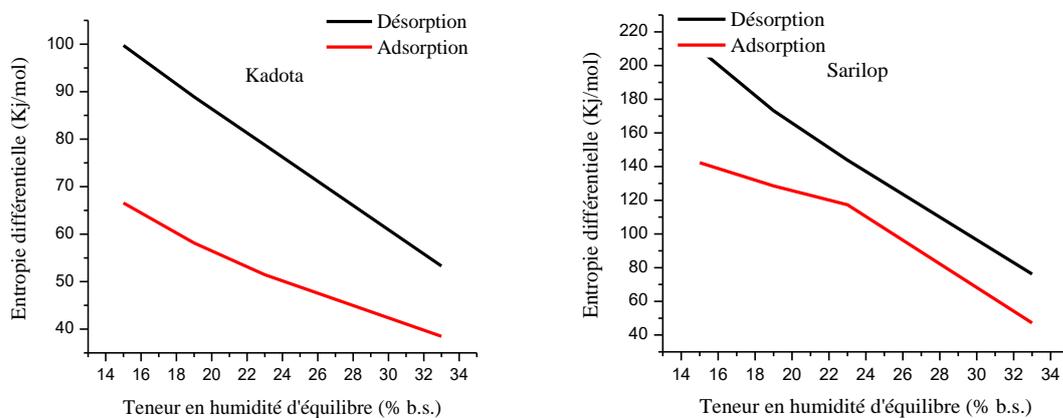


Figure 50. Entropie différentielle des isothermes pour les variétés du figuier en fonction de l'équilibre de l'humidité

5. Théorie de compensation enthalpie/entropie

La théorie de compensation de l'enthalpie, ou isocinétique a été largement étudiée pour différents processus physiques, biologiques, chimiques et biochimiques, où il a été observé que tant que certaines conditions telles que le pH ou l'activité de l'eau est modifiée, l'enthalpie d'activation et l'entropie d'activation changent en conséquence. La théorie des modèles à compensation thermodynamique stipule que les modifications du

milieu et des conditions de réaction affectent non seulement l'entropie d'activation mais aussi l'enthalpie de réaction (Labuza, 1980 ; Liu et Guo, 2001).

Généralement, une interaction ou une liaison intermoléculaire plus forte (liée à l'enthalpie) conduit à une plus grande réduction de la liberté de configuration et donc un plus grand ordre du système (lié à l'entropie). Cela pourrait être la cause de l'enthalpie-entropie. Il a été rapporté que la compensation résulte de changements dans la nature de l'interaction entre le soluté et le solvant à l'origine de la réaction et que la relation entre l'enthalpie et l'entropie pour une réaction spécifique est linéaire (Laidler, 1959). Pour cette relation, la température isocinétique peut être déterminée à partir de la pente de la ligne et, si la théorie est valide, elle doit être constante à tout moment. L'isocinétique (Heyrovsky, 1970) La température représente la température à laquelle le taux L'existence de la théorie de la compensation implique qu'un seul mécanisme de réaction est suivi par tous les membres de la réaction et, par conséquent, une évaluation fiable de la série isocinétique Cette relation aide à élucider les mécanismes de réaction (Lai et al., 2000).

La chaleur isostérique nette (q_{st}) en fonction de l'entropie différentielle (ΔS) est présentée dans la figure 51. Une relation linéaire a été observée avec des coefficients de détermination élevés ($R^2 \geq 0,998$ pour "Kadota" et $R^2 \geq 0,91$ pour "Sarilop") (tableau 40). Comme il s'agit d'un degré élevé de linéarité entre (q_{st}) et (ΔS), on suppose que la théorie de la compensation existe.

La température isocinétique (T_β) et l'énergie libre (ΔG_β) ont été déterminées par régression linéaire (Eq. (8)) pour toutes les données dans un intervalle de confiance de 0,95 (Tableau 40). La température isocinétique augmente en fonction de l'enthalpie différentielle, pour laquelle l'allure varie en fonction de l'adsorption et la désorption. Ces résultats corroborent avec ceux de Moyano et Zuniga (2004), qui ont rapporté des températures isocinétiques de 333,1 K pour les pommes de terre.

La température isocinétique a été comparée à la température moyenne harmonique (T_{hm}) afin de vérifier la validité de la théorie de compensation par l'équation (Eq. (10)). La valeur T_{hm} (312,78 K) diffère significativement des valeurs de T_β , confirmant ainsi la théorie de compensation des phénomènes de sorption chez la figue. Selon Krug *et al.* (1976), le processus est piloté par l'enthalpie lorsque $T_\beta > T_{hm}$, alors qu'il est contrôlé par

entropie lorsque $T_{\beta} < T_{hm}$. Pour les échantillons de la figure, la première condition a été remplie, et par conséquent le mécanisme de sorption est considéré enthalpique (Tableau 40).

D'un point de vue thermodynamique, l'énergie libre (ΔG_{β}) est un critère pour savoir si la sorption est spontanée ($-\Delta G_{\beta}$), ou non spontanée ($+\Delta G_{\beta}$) (Apostolopoulos et Gilbert, 1990 ; Gabas *et al.*, 2000). Les valeurs de ΔG_{β} , présentées dans le tableau 37, suggèrent non spontanéité du processus. La température de séchage optimale a été estimée entre 60 et 80 °C, ce qui corrobore avec les normes de séchage des produits agricoles sans toutefois, altérer leur qualité organoleptique.

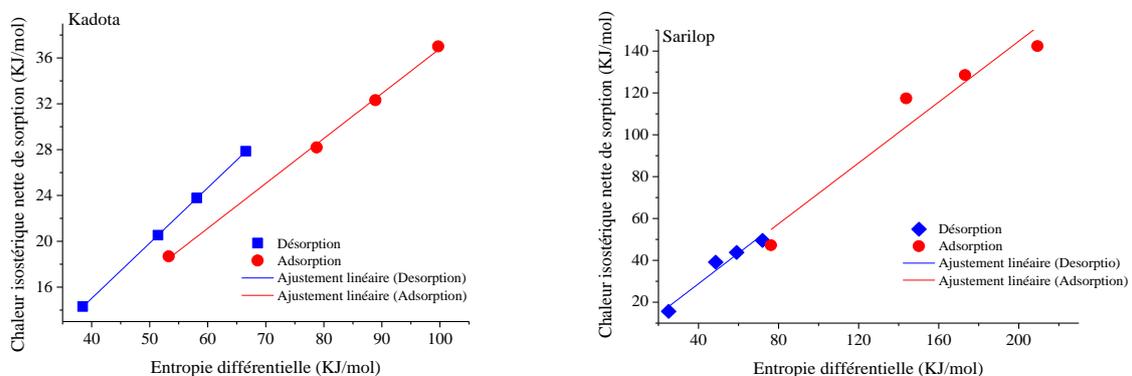


Figure 51. Relation entropie-enthalpie pour la désorption et l'adsorption de l'eau chez les deux variétés du figuier

Tableau 40. Paramètres caractéristiques de la relation enthalpie-entropie

		T_{β} (K) a	ΔG_{β} (J.mol ⁻¹)	R^2
Désorption	Kadota	347.11	987.26	0.999
	Sarilop	341.21	1425.12	0.932
Adsorption	Kadota	354.27	593.10	0.998
	Sarilop	353.68	938.52	0.910

6. Surface de l'eau (S₀)

Le tableau 41 présente la surface de l'eau (S_0) des deux variétés “Kadota” et “Sarilop” pour les températures d'équilibre de 30, 40 et 50 °C. Ces valeurs ont été estimées à l'aide de l'équation (Eq. (13)) et du taux d'humidité monocouche obtenus par le modèle GAB. S_0 joue un rôle important dans la détermination des propriétés de liaison

à l'eau des échantillons de figue. Les valeurs ont été situées entre 36,4 et 268,45 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$, ce qui correspond à celles souvent obtenues pour les produits alimentaires (Labuza, 1968). Ces résultats sont globalement similaires à ceux de Tolaba *et al.* (2004) ayant rapporté des valeurs de S_0 comprises entre 206,5 et 303,45 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ pour l'adsorption et de 200,55 à 349,65 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ pour la désorption. Dans l'ensemble, le S_0 a été plus élevé chez "Sarilop" que "Kadota". Cette grandeur diminue considérablement à mesure que la température augmente. En outre, à température constante, la surface disponible pour la désorption a été supérieure à celle de l'adsorption. Ces résultats corroborent avec l'hypothèse selon laquelle la grande surface d'adsorption est due à l'existence d'une structure microporeuse intrinsèque dans ces matériaux (Calzetta Resio *et al.*, 2000).

Tableau 41. Surface de l'eau (S_0) de deux variétés du figuier à différentes températures

T(°C)	S_0 ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ de l'échantillon)					
	Desorption			Adsorption		
	30	40	50	30	40	50
Kadota	236.95	164.85	93.8	222.15	114.8	36.4
Sarilop	268.45	172.83	79.45	239.05	127.75	56.11

7. Conclusion

Ce travail représente une étape préliminaire à l'étude de la cinétique de séchage. Les isothermes de sorption de la figue appartiennent au type II, avec une boucle d'hystérésis de type H3, et s'expriment selon une fonction polynomiale du troisième degré. Les modèles Enderby et Peleg ont montré les meilleures prédictions des données expérimentales, respectivement pour "Sarilop" et "Kadota". A température constante, le taux d'humidité d'équilibre augmente proportionnellement avec l'humidité relative. Toutefois, cette grandeur diminue avec l'augmentation de la température à une activité constante de l'eau. Pour la variété "Sarilop", la chaleur isostérique nette était deux fois le niveau nécessaire à la variété "kadota" pour briser les liaisons entre les molécules d'eau. La théorie de compensation entropie/enthalpie a montré que le processus n'est pas spontané et que la température de séchage optimale estimée pour les deux variétés du figuier se situe entre 60 et 80 °C.

Chapitre II. 2. Modélisation mathématique du séchage solaire en couche mince

Le séchage a commencé à 9 heures du matin et s'est poursuivi jusqu'à 18 heures. La figure 52 présente la variation de la température ambiante, de l'humidité relative et du rayonnement solaire au cours de l'opération à une température de 60 °C et une vitesse de 300 m³/h. La température ambiante a varié de 30 à 40 °C, tandis que l'humidité relative de l'air a fluctué de 23 à 44 %. Le rayonnement solaire horizontal a été légèrement élevé que l'incliné, avec des valeurs oscillant respectivement de 280 à 850 W/m² et de 280 à 830 W/m². Le taux d'humidité initial (base humide) a varié de 82 ± 1 % pour 'Kadota' à 79 ± 1,2 % pour 'Sarilop', et a été réduit à 23 ± 1%.

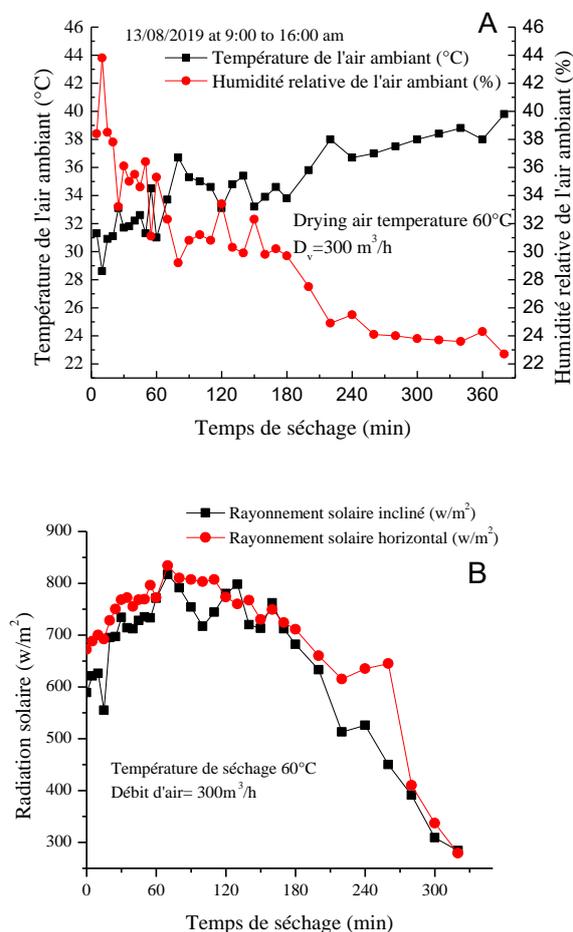


Figure 52. Variation de l'humidité relative, de la température (A) et du rayonnement solaire (B) pendant l'expérience de séchage à 60 °C et 300 m³/h.

1. Courbes de séchage

Le temps de séchage des échantillons des figes dans les différentes conditions aérothermiques est indiqué dans la figure 53. Il s'agit du temps nécessaire pour réduire le taux d'humidité des échantillons à un niveau approprié pour la conservation. Pour tous les tests, l'influence de la température et de la vitesse sur la teneur en eau d'équilibre est prépondérante dans toute la gamme de l'activité de l'eau. Cette influence est due à l'augmentation de la pression osmotique de l'eau dans les échantillons. Ainsi, à une vitesse constante de l'air, une augmentation de la température de 60 à 80 °C, entraîne une diminution considérable du temps de séchage. De même, pour la même température, l'augmentation de la vitesse de 150 à 300 m³/h diminue significativement le temps du processus. Finalement, la combinaison entre une température de séchage de 80 °C et un débit d'air de 300 m³/h a été optimale pour le séchage des figes, et ce pour une durée moyenne de 200 min.

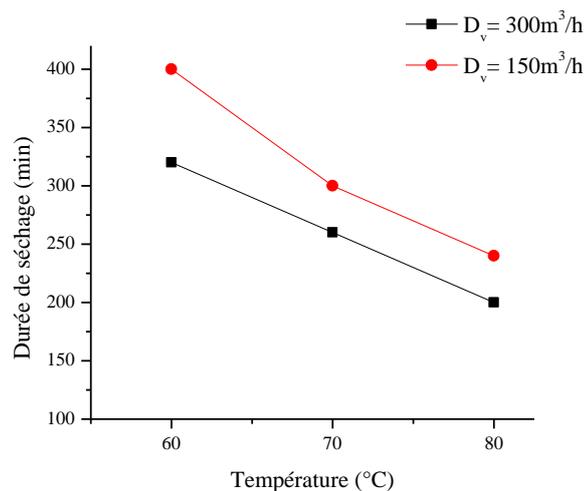


Figure 53. Temps de séchage en fonction de la température et du débit volumique de séchage. D_v : correspond au débit de l'air

La figure 54 présente la cinétique du séchage selon les différentes conditions aérothermiques. Ces courbes expriment l'évolution du taux d'humidité en fonction du temps. En effet, une forte diminution de ce taux a été observée chez les deux variétés. L'allure décroissante des courbes indique l'absence de la phase 0 et I matérialisant, respectivement la période de mise en température du produit et du séchage proprement dit à allure constante. Donc, seule la période à allure décroissante ou période de

ralentissement (phase II) est observée. Durant cette phase de séchage, le processus de transfert de l'eau du produit est probablement régi par la diffusion.

Ces observations sont en accord avec plusieurs travaux antérieurs (Bahammou *et al*, 2019 ; Ouaabou *et al*, 2018 ; Garba *et al*, 2015).

Il est à noter que la vitesse de 300 m³/h entraîne une diminution rapide de la teneur en humidité et donc une réduction du temps de séchage. En revanche, à une faible vitesse ($D_v=150$ m³/h), le temps de séchage a considérablement augmenté. Ainsi, à $D_v= 300$ m³/h le temps de séchage a varié de 200, 260 à 360 min à 80, 70 et 60 °C, respectivement. Pour une D_v 150m³/h, le temps était de 240, 300 à 400 min, respectivement pour 80, 70 et 60 °C. Finalement, le temps de séchage a été réduit d'environ 57% lorsque la température de séchage est portée de 60 à 80°C.

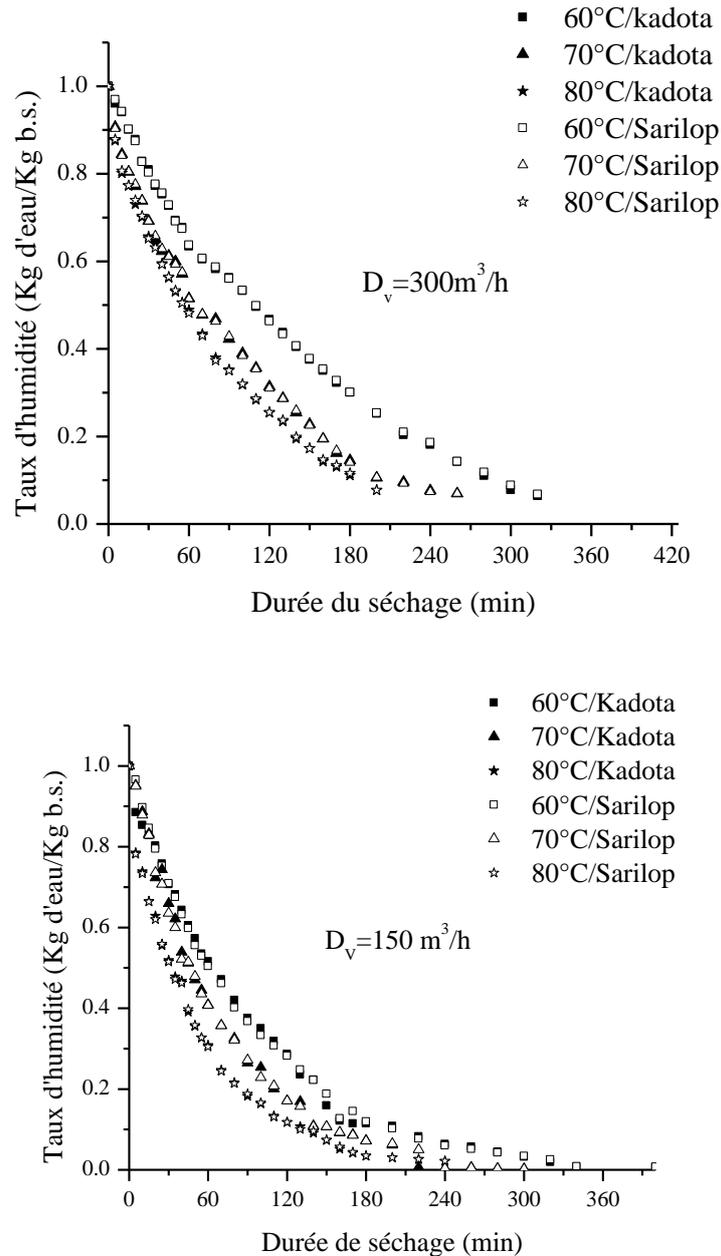


Figure 54. Courbes expérimentales de l'humidité des figes en fonction du temps, à différentes températures de l'air (60, 70 et 80°C) et différents débits volumiques de séchage (150 et 300 m³/h)

2. Changement des caractéristiques physiques et de couleur

La figure 55 illustre l'état des fruits frais entiers et leurs tranches séchées à 80 °C et 300 m³/h. Un effet significatif des conditions du séchage (T et D_v) sur les caractéristiques physiques des tranches des figes a été révélé. Ces paramètres physiques ont concerné l'épaisseur des tranches, l'activité de l'eau (a_w) et la différence de couleur totale (ΔE) (tableau 42). L'a_w, facteur déterminant de la croissance des micro-organismes et des réactions de dégradation chimique et physique, a varié de 0,3 à 0,46, ce qui correspond

aux normes standards des aliments secs (Esbelin *et al.*, 2018). L'épaisseur des tranches des figes a été considérablement réduite de 7 mm à des valeurs comprises entre 2,6 et 4,15 mm. La différence de couleur totale (ΔE), indicateur des réactions de brunissement enzymatiques ou non enzymatiques (Gupta *et al.*, 2011), a diminué de façon remarquable lorsque la température et le D_v augmentent (Tableau 42).

Il est à noter que tous ces paramètres ont été significativement plus élevés à des valeurs faibles de température et de débit d'air (D_v). Par conséquent, les meilleures conditions physiques de conservation des tranches de figes ont été obtenues à des valeurs élevées de température et de débit de l'air (80 °C et 300 m³/h, respectivement). Le tableau 41 montre l'impact très significatif des conditions du séchage sur la qualité physique des figes. Cependant, aucune différence significative n'a été observée entre les deux variétés.



Figure 55. Images des figes fraîches entières et de leurs tranches séchées à 80 °C et 300 m³/h. a,b et c,d font référence respectivement à "Sarilop" et "Kadota".

Tableau 42. Caractéristiques physiques des tranches des figues séchées en fonction de la température, du débit d'air

	D _v =150 m ³ /h		D _v =300 m ³ /h			
	60 °C	70 °C	80 °C	60 °C	70 °C	80 °C
Variétés	Activité de l'eau (a _w)					
Kadota	0,44 ±0	0,44 ±0	0,34 ±0,01	0,41 ±0,01	0,36 ±0,01	0,3 ±0
Sarilop	0,46 ±0,02	0,4 ±0,01	0,35 ±0,1	0,4 ±0,01	0,35 ±0,02	0,31 ±0,01
	Epaisseur des tranches (mm)					
Kadota	4,01 ±0,46	3,85 ±0,52	3,47 ±0,39	4,15 ±0,47	3,76 ±0,72	2,9 ±0,7
Sarilop	4,1 ±0,18	3,93 ±0,31	4,13 ±0,64	4,03 ±0,57	3,13 ±0,39	2,68 ±0,47
	ΔE (Epiderme)					
Kadota	44,26 ±0,7	33,54 ±1,3	30,1 ±3	46,76 ±1,6	43 ±2,3	22,09 ±1,1
Sarilop	50,7 ± 2,6	48,8 ±3	44,69 ±0,8	35,24 ±4,5	33,7 ±2,7	23,52 ±2,2
	ΔE (Pulpe)					
Kadota	37,51 ±4,2	35,24 ±3,6	31,91 ±3,6	43,91 ±3	40,36 ±1,9	29,77 ±2,9
Sarilop	44,13 ±1,8	35,67 ±0,7	32,06 ±1,4	42,5 ±0,5	37,71 ±3,4	30,5 ±1,4

Tableau 43. Résultats de l'analyse de la variance à l'aide de la procédure GLM

Facteur	Valeur de λ de Wilks'	F	Hypothèse dl	Erreur dl	Signification
Variété	,837	2,23	2	23	0,13
Débit de l'air	,081	130,26	2	23	<0,001
Température	,028	57,81	4	46	<0,001
Température * Débit de l'air * Variété	,139	5,54	14	46	<0,001

3. Courbe caractéristique du séchage

La courbe caractéristique de séchage (CCS) consiste à rassembler les résultats expérimentaux sur une seule courbe pouvant être réutilisable. Le modèle polynomial a été choisi dans différents travaux pour le lissage de la courbe caractéristique de séchage moyennant une méthode d'optimisation non linéaire Levenberg Marquard (Belghit *et al.*, 2000 ; Lahsasni *et al.*, 2004 ; Ben Mabrouk *et al.*, 2012). A l'aide du logiciel OriginLab Pro V 8.1, un modèle polynomial de troisième degré a été utilisé pour décrire le comportement de la figue à l'échelle macroscopique au cours du séchage. Ce modèle s'exprime selon l'équation suivante $f = 0,7945MR - 0,8774 MR^2 + 0,6000MR^3$ (Figure 56a). La figure 56b montre un bon regroupement des courbes obtenues à différentes températures de l'air variant entre 60°C et 80°C.

Deux critères sont utilisés pour évaluer la qualité de l'ajustement, soient l'erreur standard (SE) et le coefficient de corrélation (r). Ces statistiques sont données au tableau

33. Il convient de noter que ces courbes ont montré un niveau de corrélation important. Ainsi, la valeur de r était de 0,9192 pour " Kadota " et de 0,174 pour " Sarilop ". L'erreur résultant de ce lissage a été faible avec une moyenne inférieure à 0,15 (Tableau 44).

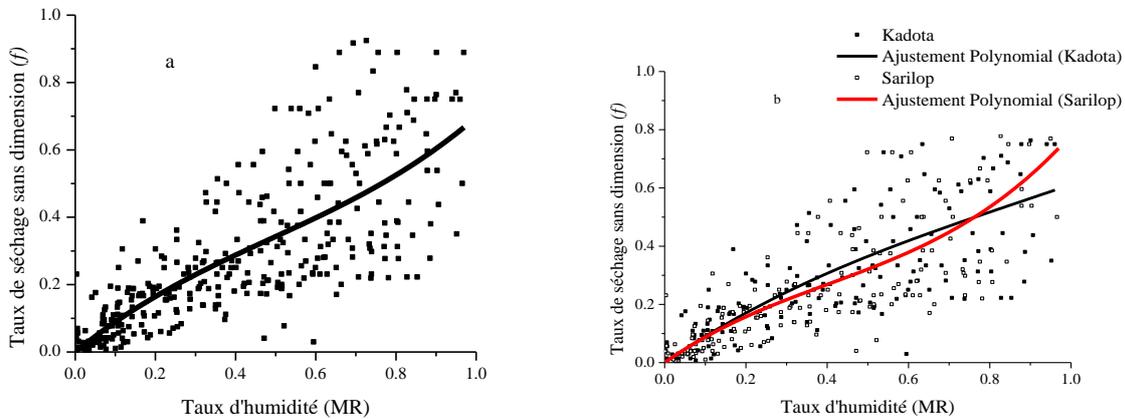


Figure 56. Courbe caractéristique de séchage (a) et taux de séchage sans dimension en fonction du taux d'humidité des variétés Kadota et Sarilop (b)

Tableau 44. Équations polynomiales des courbes caractéristiques du séchage pour les deux variétés du figuier

Variétés	Courbe caractéristique de séchage	r	SE
Kadota	$0,9544MR - 0,5549MR^2 + 0,2122MR^3$	0,9192	0,1449
Sarilop	$0,9810 MR - 1,1576MR^2 + 0,9582MR^3$	0,9174	0,1406

4. Diffusion effective de l'humidité

La diffusivité effective de l'humidité (D_{eff}) est déterminée graphiquement par une représentation logarithmique de la teneur en humidité réduite X^* ($\ln(X^*)$) en fonction du temps pour les différentes conditions du séchage (figure 57). L'allure des courbes illustre l'effet de la température et du débit de l'air sur les coefficients de diffusion effective des tranches de figes. Ainsi, à un débit d'air constant, D_{eff} augmente proportionnellement avec la température et le débit de séchage (figure 57). Le tableau 45 présente les valeurs de D_{eff} pour les deux variétés dans les différentes conditions expérimentales. En général, D_{eff} a varié entre $1,9556 \times 10^{-9}$ et $4,0511 \times 10^{-8}$ pour toutes les conditions aérothermiques. Ces valeurs se situent entre 10^{-8} et $10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, fourchette relative aux produits agro-alimentaires.

Lorsque les tranches de figes sont séchées à une température et un débit d'air plus élevés, l'énergie thermique accélère systématiquement l'activité des molécules d'eau, ce qui augmente la diffusivité de l'humidité (Wang *et al.*, 2015). Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Ouaabou *et al.* (2018) sur les cerises et Wang *et al.* (2016) sur les raisins, qui ont montré que la diffusivité effective de l'humidité augmente en fonction de la température de séchage.

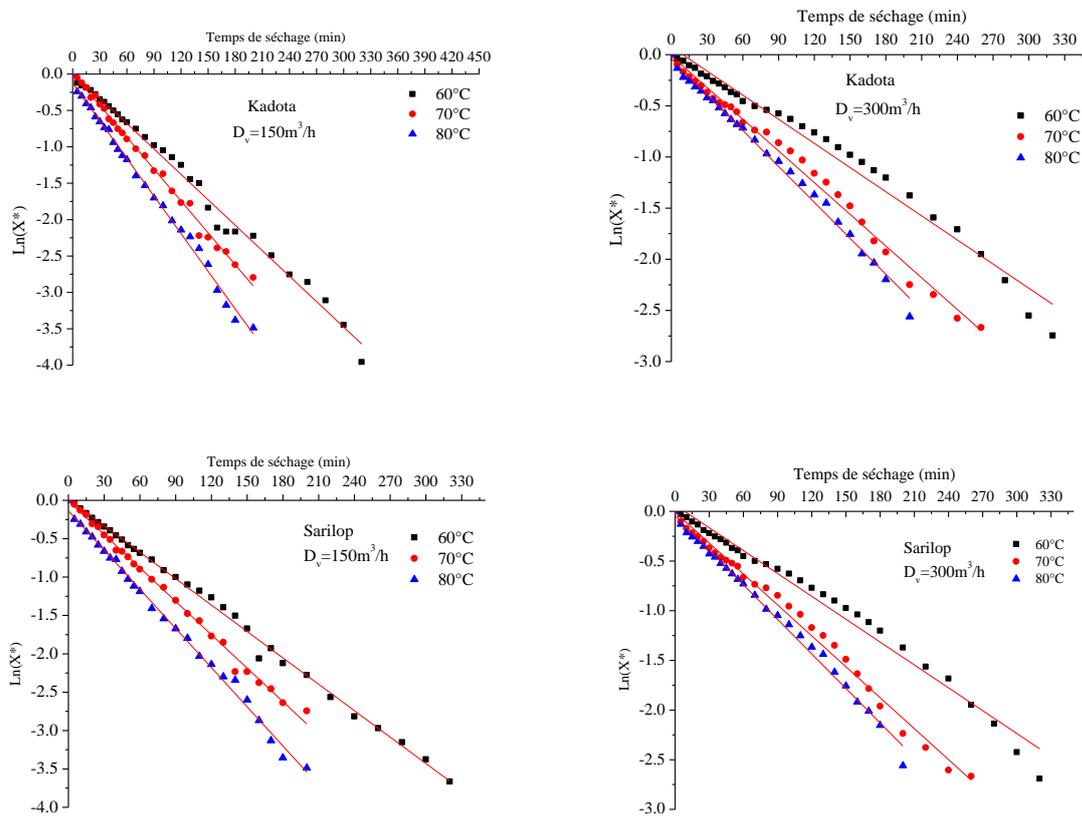


Figure 57. Représentation graphique de $\ln(Y^*)$ en fonction du temps de séchage selon les différents débits de l'air pour les deux variétés du figuier 'Kadota' et 'Sarilop'.

Tableau 45. Valeurs de diffusivité effective des tranches de figes pour les différentes conditions du séchage

Variété	Debit de l'air (m ³ /h)	Température (°C)	D _{eff} (m ² /s)	R	SE
Kadota	150	60	5,11 10 ⁻⁰⁹	0,995	0,103
		70	1,79 10 ⁻⁰⁸	0,997	0,061
		80	3,09 10 ⁻⁰⁸	0,997	0,075
	300	60	1,95 10 ⁻⁰⁹	0,989	0,111
		70	2,99 10 ⁻⁰⁹	0,995	0,071
		80	9,97 10 ⁻⁰⁹	0,996	0,058
Sarilop	150	60	3,08 10 ⁻⁰⁹	0,998	0,060
		70	2,41 10 ⁻⁰⁸	0,99	0,059
		80	4,05 10 ⁻⁰⁸	0,997	0,070
	300	60	2,20 10 ⁻⁰⁹	0,995	0,072
		70	1,11 10 ⁻⁰⁸	0,996	0,058
		80	1,66 10 ⁻⁰⁸	0,991	0,098

5. Energie d'activation

L'énergie d'activation (E_a), barrière énergétique que le système doit franchir pour se stabiliser, a été déduite de la représentation graphique $\ln(D_{eff})$ en fonction de l'inverse de la température ($1/T$), dont les résultats ont été présentés dans la figure 58 et le tableau 46. Cette variable est un indicateur de l'énergie nécessaire pour éliminer l'humidité de l'échantillon. Plus sa valeur est élevée, plus le coefficient de diffusion devient sensible à la température. Généralement, au début du processus, une petite d'énergie est requise pour éliminer l'humidité, et au fil du temps, l' E_a augmente en raison de la résistance des tissus des échantillons à l'humidité (Doymaz, 2005).

Les valeurs obtenues pour E_a ont oscillé entre 4699,41 et 7502,37 kJ kg⁻¹. Indépendamment de la vitesse, l'énergie E_a nécessaire à la diffusion de l'eau au niveau des fruits de "Kadota", a été inférieure à celle de la variété "Sarilop". Le coefficient de détermination de la régression linéaire s'est révélé légèrement supérieur à 0,95 avec un faible écart-type en moyenne inférieur à 0,6 (tableau 46). Les résultats sont comparables à ceux rapportés dans des études similaires sur les cerises (Ouaabou *et al.*, 2018), les tranches de banane (Doymaz, 2010) et sur les pêches et les fraises (Johnson et Mukhaini, 2016).

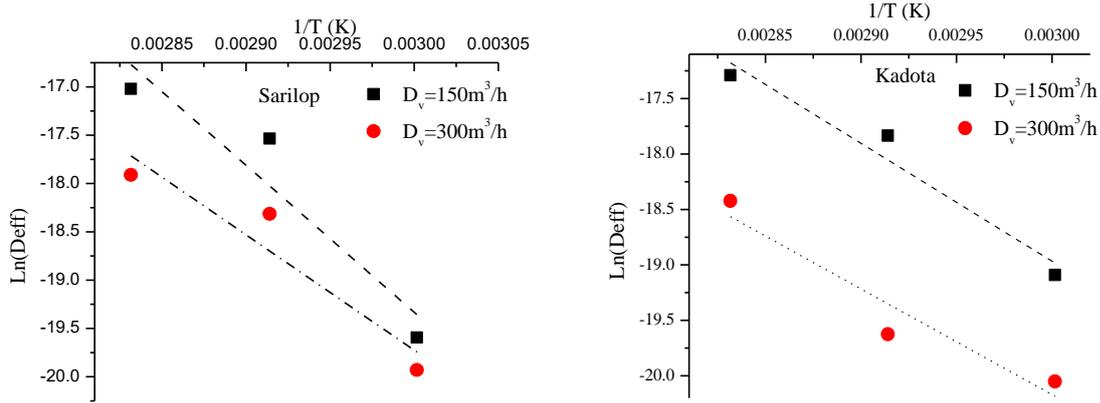


Figure 58. Représentation graphique de $\ln(D_{eff})$ contre $1/T$ pour les deux variétés du figuier à différents débits d'air de séchage

Tableau 46. Energie d'activation et coefficient de corrélation correspondant aux différents niveaux des flux d'air du séchage

Variété	D_v	$E_a(\text{kJ/kg})$	r	SE
Kadota	150	5240,20	0,9786	0,2691
	300	4699,41	0,9594	0,3369
Sarilop	150	7502,37	0,9504	0,5986
	300	5886,17	0,9502	0,4711

6. Modélisation des courbes de séchage

Les données expérimentales de la teneur en eau réduite obtenues à des températures de séchage différentes, ont été simulées dans différents modèles de séchage (Tableau 47). La régression non linéaire a été utilisée pour déterminer les constantes du modèle utilisé. La pertinence d'un modèle est déterminée à partir des paramètres statistiques tels le coefficient de corrélation (r) élevé (tendant vers 1) et la faible valeur de Chi-deux (χ^2) (tendant vers 0). En effet, les valeurs de r ont oscillé de 0,5977 à 0,9997 pour 'Sarilop' et de 0,6009 à 0,9997 pour 'Kadota', tandis que χ^2 a varié de $1,13 \times 10^{-3}$ à $0,2353$ et de $6,4 \times 10^{-3}$ à $0,59$, respectivement pour 'Sarilop' et 'Kadota' (Tableau 47). Parmi tous ces modèles, "Handerson et Pabis modifié" a exprimé les valeurs les plus élevées de r et les valeurs les plus faibles de χ^2 . Ce modèle a permis de prédire avec une précision

élevée la courbe de séchage pour le pistache (Aktas et Polat, 2007), le kiwi (Doymaz, 2009) et la noix de coco (Madhiyanon *et al.*, 2009).

Les taux d'humidité expérimentaux et ceux prédits par le modèle choisi, ont été tracés en fonction de différentes conditions du séchage (Figures 59 et 60). Les résultats de l'ajustement démontrent que la prédiction du modèle "Handerson et Pabis modifié" est appropriée pour décrire la cinétique du séchage des tranches de figues. La figure 58 compare la variation temporelle du taux d'humidité expérimental à celui prédit par le modèle à une vitesse de 150 m³/h. Il est à noter que les deux courbes se superposent parfaitement, avec une valeur très élevée de *r* dépassant généralement 0,99.

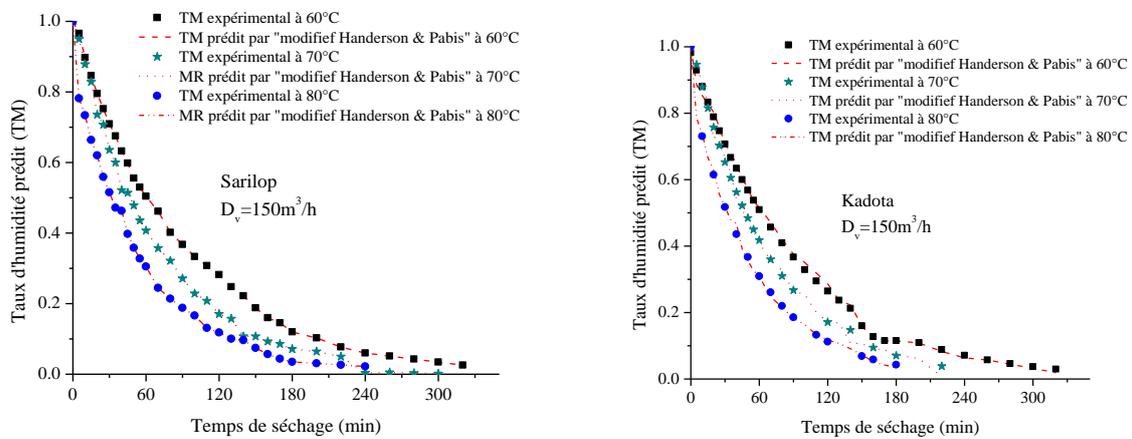


Figure 59. Données expérimentales du taux d'humidité en fonction du temps de séchage avec le modèle modifié de Handerson et Pabis à $D_v=150 \text{ m}^3/\text{h}$.

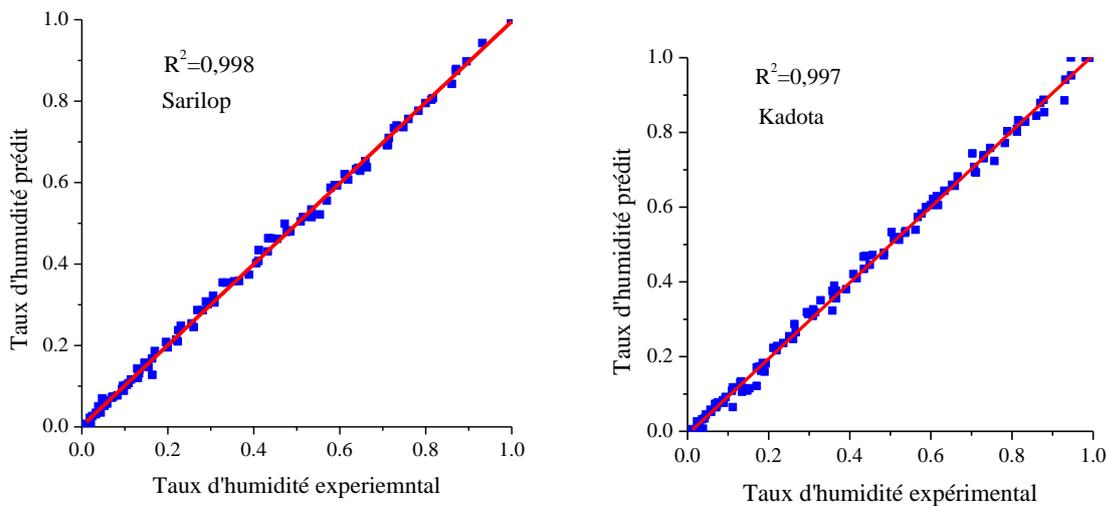


Figure 60. Comparaison des taux d'humidité expérimentaux et prédits des deux variétés du figuier par le modèle modifié de Handerson et Pabis

Tableau 47. Statistiques obtenues à partir de tous les modèles appliqués sur les données du séchage des deux variétés du figuier en fonction de la température et du débit d'air.

	Température (°C)	Sarilop				Kadota			
		D _v =150		D _v =300		D _v =150		D _v =300	
		r	χ ²						
Lewis	60	0,9993	0,0011	0,9975	0,0196	0,9979	0,0199	0,9972	0,0212
	70	0,9991	0,133	0,9946	0,0283	0,9983	0,0183	0,9943	0,029
	80	0,9897	0,038	0,9932	0,0304	0,9905	0,037	0,9928	0,0313
	Moyenne	0,9960	0,0573	0,9951	0,0261	0,9955	0,0250	0,9947	0,0271
Page	60	0,9993	0,0114	0,9975	0,0198	0,9989	0,0202	0,9021	0,59
	70	0,9991	0,0133	0,9966	0,0230	0,9985	0,0172	0,9964	0,0234
	80	0,9976	0,01875	0,9975	0,0187	0,9976	0,0190	0,9969	0,0207
	Moyenne	0,9986	0,0144	0,9972	0,0205	0,9983	0,0188	0,96513	0,2113
Wang and Singh	60	0,9757	0,0691	0,995	0,0283	0,9756	0,0684	0,995	0,028
	70	0,9736	0,072	0,9843	0,0490	0,9776	0,0673	0,9838	0,0497
	80	0,9231	0,1059	0,9821	0,0501	0,9262	0,1046	0,9828	0,0326
	Moyenne	0,9574	0,0823	0,9871	0,0425	0,9598	0,0801	0,9872	0,0367
Logarithmic	60	0,9994	0,0114	0,9986	0,0150	0,9984	0,018	0,9986	0,0153
	70	0,9992	0,013	0,9976	0,0194	0,9986	0,0167	0,9974	0,0203
	80	0,9965	0,0233	0,9978	0,018	0,9967	0,0236	0,9976	0,0187
	Moyenne	0,9983	0,0159	0,998	0,0174	0,9979	0,0194	0,9978	0,0181
Diffusion approximation	60	0,9994	0,0115	0,9981	0,0177	0,9979	0,0201	0,9974	0,0206
	70	0,9991	0,0136	0,9946	0,0293	0,9985	0,0175	0,9943	0,0301
	80	0,9897	0,0402	0,9993	0,0099	0,9905	0,0388	0,9928	0,0326
	Moyenne	0,9960	0,0217	0,9973	0,0190	0,9956	0,0254	0,9948	0,0277
Midilli-Kucuk	60	0,7182	0,2273	0,7384	0,1985	0,7212	0,2234	0,7424	0,1982
	70	0,6944	0,2353	0,6824	0,2115	0,7031	0,2359	0,682	0,2116
	80	0,5977	0,2301	0,6093	0,2208	0,6009	0,2307	0,6127	0,2203
	Moyenne	0,6701	0,2309	0,6767	0,2102	0,6750	0,23	0,6790	0,2100
Handerson and Pabis	60	0,9993	0,0114	0,9975	0,0199	0,9981	0,0191	0,9942	0,0215
	70	0,9992	0,0129	0,9973	0,0203	0,9985	0,0173	0,9971	0,021
	80	0,996	0,0244	0,9978	0,0174	0,9962	0,024	0,9976	0,0185
	Moyenne	0,9981	0,0162	0,9975	0,0193	0,9976	0,0201	0,9963	0,02033
Handerson et Pabis modifié	60	0,9994	0,0122	0,9975	0,0214	0,9981	0,0204	0,9971	0,0232
	70	0,9992	0,0138	0,9974	0,0217	0,9985	0,0186	0,9971	0,0226
	80	0,9994	0,0095	0,9997	0,0066	0,9993	0,0108	0,9997	0,0064
	Moyenne	0,99933	0,0118	0,9982	0,0165	0,9986	0,0166	0,9979	0,0174
Two-term	60	0,9994	0,0116	0,9975	0,206	0,9985	0,0172	0,9977	0,0199
	70	0,9992	0,0133	0,998	0,1786	0,9985	0,0177	0,9979	0,0185
	80	0,9961	0,0254	0,9993	0,0102	0,9962	0,0249	0,9991	0,0141
	Moyenne	0,9982	0,0167	0,9982	0,1316	0,9977	0,0199	0,9982	0,0175

7. Conclusion

L'objectif dans ce travail est l'étude des cinétiques de séchage de la figue en utilisant la méthode à convection forcée indirecte, où les conditions aérothermiques sont contrôlables. Les résultats ont été abordés de deux manières : une approche appelée courbe caractéristique de séchage qui a permis de regrouper les cinétiques de séchage en une courbe unique, et une deuxième approche des équations empiriques ou semi-théoriques, permettant de décrire l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps. Le lissage de la courbe caractéristique de séchage des tomates sont bien décrites par un polynôme de 3^{ème} degré. Cette courbe donne des informations précieuses pour la prédiction de l'allure de séchage pour d'autres conditions expérimentales différentes de celles dans lesquelles nos essais ont été réalisés.

Le modèle « Handerson et Pabis modifié » a été le plus fiable pour prédire l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps. La température a , en effet, une influence plus importante que la vitesse et l'humidité de l'air sur les cinétiques de séchage, pour lesquelles les coefficients de diffusion de la figue dépendent à la fois de la température et du débit d'air. Le temps de ce processus peut être considérablement raccourci en combinant une température (80 °C) et une vitesse de l'air élevées (300 m³/h), où les caractéristiques physiques des échantillons sont très importantes par rapport aux autres combinaisons.

Chapitre II. 3. Huile de figes comme autres voies de valorisation lipochimique du figuier : Composition en acides gras, teneur phénolique totale et activité antioxydante

1. Teneur en huile

L'huile, extraite des graines, généralement de couleur jaune pâle (Figure 61), a enregistré des niveaux ayant varié significativement en fonction des échantillons [F (3, 8) =37,06, p<0,001] (figure 62). La plus haute teneur a été enregistrée par les clones locaux "C7A14" (29,65 ±1,2 %) et "C11A21" (28,96 ±0,6 %), alors que les variétés "Borjassoute Noir" et "White Adriatic" ont eu un faible rendement, soit respectivement 21,54 ±1,7 et 24,71 ±2,1% (Figure 62). Ces niveaux d'huile ont été généralement similaires à ceux rapportés dans d'autres graines des fruits comme la citrouille (27,83%) (Alfawaz, 2004), le melon (25%) (Yanty *et al.*, 2008) et le mangoustan (21,18%) (Ajayi *et al.*, 2007). Cependant, ils sont plus élevés que ceux rapportés pour les graines de la goyave (16%) (Prasad *et al.*, 1994) et du durian (1,8 %) (Berry, 1980). Il est à noter que ces niveaux sont largement élevés par rapport aux graines de la figue de barbarie, dont la teneur est comprise entre 5,4 et 9,9% (Taoufik *et al.*, 2015).

Généralement, les composantes macro-qualitatives, dont entre autres le rendement en huile, varient en fonction des différences variétales, des variations géographiques ou du facteur de pollinisation (Raihana *et al.*, 2015 ; Górnas et Rudzińska, 2016). Les présents résultats, nonobstant, présument que cette variabilité serait principalement attribuée au cultivar.

Avec un rendement en huile important, les graines des figes peuvent être économiquement attrayantes pour des fins industrielles similaires à celles d'autres graines de fruits telle la citrouille, la goyave, le kiwi, ... etc. De plus, encourager la commercialisation de ces huiles peut avoir un grand impact économique pour les communautés locales et contribuer de manière significative à l'économie de ménage.

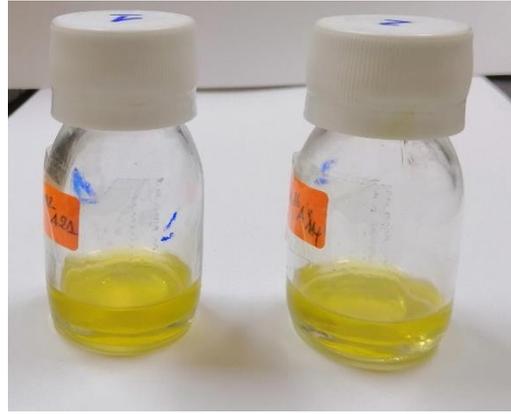


Figure 61. Aspect des huiles extraites des graines des figes

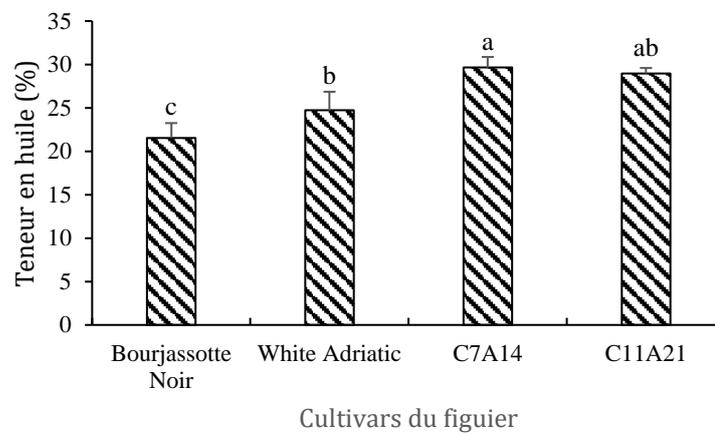


Figure 62. Teneur en huile (%) des graines des figes (valeurs moyennes \pm écart-type). Les différences statistiquement significatives entre les cultivars sont présentées au-dessus des barres d'erreur (a-c).

2. Composition en acides gras de l'huile de graines

Le chromatogramme typique de l'huile de fige est présenté dans la figure 62 (exemple de la variété "White Adriatic"). L'analyse chromatographique a révélé 11 acides gras identifiés, dont les concentrations exprimées en % (m/m) sont présentées dans le tableau 48. Ces résultats indiquent que l'huile est composée principalement d'acides gras insaturés totaux (Total Unsaturated Fatty Acids "TUFA") dont la teneur moyenne a été de $88,12 \pm 0,15$. Les acides gras mono-insaturés "MUFA" (acides oléique, eicosanoïque, heptadécénoïque et palmitoléique) et les polyinsaturés (Polyunsaturated Fatty Acids "PUFA") (acides linoléique et linoléique) ont enregistré des teneurs moyennes respectives de $15,18 \pm 0,18$ et $72,95 \pm 1,1\%$ (tableau 48).

L'analyse de la variance a révélé des différences très significatives entre les teneurs en acides gras ($p < 0,001$), à l'exception des acides gras mineurs à savoir C15:0, C17:0 et C20:0. En outre, le rapport entre les acides gras saturés totaux (Total Saturated Fatty Acids "TSFA") et les insaturés totaux (TUFA) n'a pas montré de différence significative. Cela pourrait être dû au fait que les TSFA ont été détectés en très faibles concentrations dans tous les échantillons et à des niveaux similaires (tableau 48).

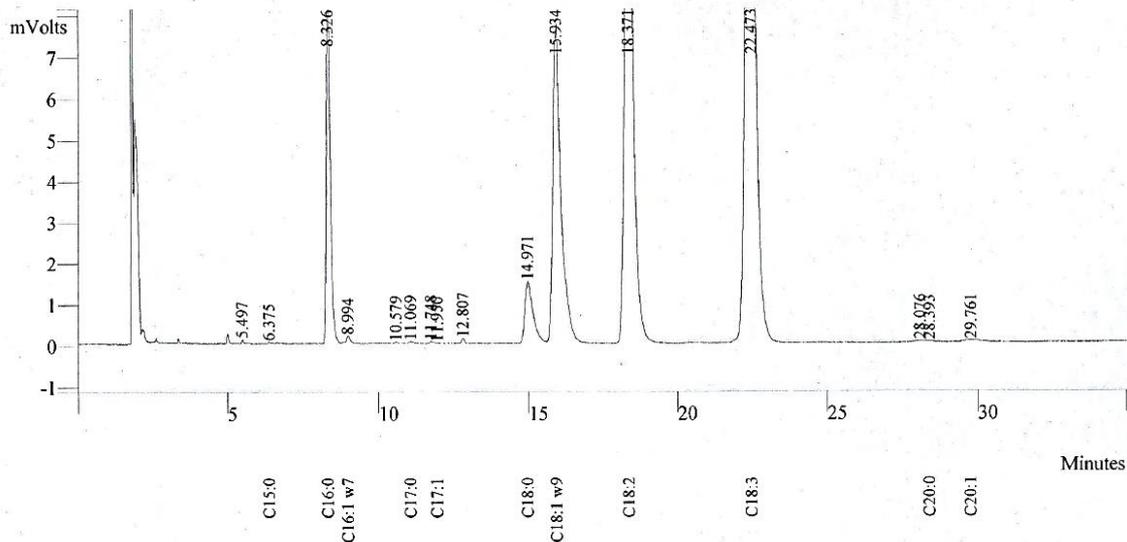


Figure 63. Chromatogramme des acides gras de l'huile des graines des figes. Exemple de la variété "White Adriatic" (C15:0 = acide pentadécylique, C16:0 = acide palmitique, C16 : ω1 = acide palmitoléique, C17:0 = acide margarique, C17 :1 = acide heptadécénoïque, C18:0 = acide stéarique, C18:1 ω9 = acide oléique, C18:0 = acide linoléique, C18:3 = acide g-linolénique, C20:0= acide arachidique, C20:1= acide gondoïque).

Dans tous les échantillons, C18:3 a été l'acide gras prédominant, avec des valeurs moyennes oscillant entre $38,43 \pm 0,01$ (C7A14) et $43,57 \pm 0,04$ % (Adriatique blanc). C18:2 a occupé le second rang avec des teneurs moyennes comprises entre $28,9 \pm 0,06$ (Adriatique blanc) et $34,5 \pm 0,04\%$ (C11A21). C18:1, quant à lui, a été le troisième avec des moyennes de $13,44 \pm 0,12$ (C11A21) à $15,64 \pm 0,02\%$ (Bourjassotte Noir) (tableau 48). Parmi ces acides gras insaturés, l'acide oléique aurait une activité efficace de réduction du cholestérol plasmatique, tandis que les acides linoléique et linoléique sont connus pour leur capacité de conversion en hormones comme les eicosanoïdes impliqués dans des réactions physiologiques comme la coagulation sanguine et la réponse immunitaire (Oomah et Mazza, 1999).

Le rapport des acides gras mono (Monounsaturated Fatty Acids "MUFA") et polyinsaturés (Polyunsaturated Fatty Acids "PUFA") ont varié sensiblement d'un

échantillon à l'autre. Il a été, en effet, plus élevé dans "Bourjassotte noire" (0,22) et plus faible dans le clone "C11A21" (0,18).

Pour les acides gras saturés, l'acide palmitique (C16:0) et l'acide stéarique (C18:0) ont été prédominants, avec des teneurs moyennes respectives de $8,75 \pm 0,21$ et $3 \pm 0,3$ %. Néanmoins, l'acide arachidique (C20:0), margarique (C17:0) et pentadécylique (C15:0) ont été identifiés à de très faibles niveaux ($0,09 \pm 0,04$, $0,046 \pm 0,01$ et $0,02 \pm 0,03$ %, respectivement). Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés pour la goyave (87,3% et 11,8% pour TUFAs et TSFAs, respectivement) par Vosoughkia *et al.* (2011) et pour la figue de barbarie (83 % de TUFAs et 16-17% de TSFAs) par Taoufik *et al.* (2015). Contrairement à nos résultats, les acides gras saturés ont été prédominants dans les graines de mangoustan (59,6% du TSFA et 35,3% du TUFAs) pour Ajayi *et al.* (2007) (tableau 46).

3. Ratios d'acides gras

La comparaison des acides gras individuels entre les cultivars du figuier peut être associée à la pollinisation, qui est nécessaire au développement des graines. Ainsi, les graines sont généralement avortées, à moins qu'elles ne soient pollinisées. Pour cette raison, plusieurs ratios ont été utilisés, tels le ratio de désaturation oléique (ODR), le ratio de désaturation linoléique (LDR) et ω -6/ ω -3. Ces ratios ont été largement utilisés, car les facteurs précités sont interdépendants et pourraient de ce fait affecter la comparaison entre les échantillons de l'huile (Velasco *et al.*, 1998).

Ces ratios ont montré des différences de désaturation significatives à un niveau $p < 0,001$ (tableau 49). Le ratio de désaturation linoléique (LDR) a varié entre les cultivars de 0,53 à 0,6, tandis que le ratio de désaturation oléique (ODR) s'est situé entre 0,82 et 0,85. Le rapport ω -6/ ω -3 a oscillé, quant à lui entre 0,66 et 0,86. En effet, le ratio ODR a été plus élevé chez tous les cultivars que LDR (tableau 40). Pour les deux, les cultivars "C11A21" et "White Adriatic" ont respectivement présenté les valeurs les plus élevées. Cette forte tendance de désaturation explique les niveaux élevés de 18:3 dans tous les cultivars. Ainsi, dans le cas de "White Adriatic", la combinaison d'un niveau élevé de ODR et de LDR a conduit à une teneur très élevée en C18:3 (de 43,57 %).

L'équilibre entre les oméga-6 (ω -6) et les oméga-3 (ω -3) est un déterminant important de la qualité de l'huile et un paramètre critique dans l'alimentation humaine

(Simopoulos, 2016). En général, tous les échantillons ont présenté de très faibles ratio ω -6/ ω -3, avec une valeur moyenne de 0,77. Les clones locaux "C7A14" et "C11A21" ont enregistré des niveaux respectifs de 0,88, et de 0,86, légèrement importants par rapport aux variétés "Bourjassotte Noir" (0,69) et "White Adriatic" (0,66). Dans l'huile des graines du mûrier, ce ratio a été d'environ 3,63, soit trois fois plus élevé que l'huile de graines de sureau (1,19). Il convient de noter que ce rapport à des valeurs très faibles est conseillé pour une alimentation saine (DACH, 2002).

Plusieurs rapports ont démontré que la disponibilité et l'activité biologique des acides gras oméga-6 sont inversement liées à la concentration des acides gras oméga-3 dans les tissus végétaux (Simopoulos, 2016). En effet, le ratio santé ω 6/ ω 3 devrait être inférieur à 5 (OMS et FAO, 1994), et il a été d'ailleurs recommandé que les consommateurs devraient adopter un régime selon un ratio d'environ 1 (Simopoulos, 2002). Un manque de ω 3 dans l'alimentation humaine quotidienne est à l'origine de certains problèmes de santé tels que les lipides sanguins, les maladies auto-immunes, cardiovasculaires et inflammatoires (Carvalho *et al.*, 2006).

Tableau 48. Profils d'acides gras de l'huile des graines des figues étudiés déterminés par chromatographie en phase gazeuse liquide (% m/m)

Cultivars	C15:0	C16:0	C16:1	C17:0	C17:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:0	C20:1	MUFA	PUFA	TSFA	TUFA	MUFA /PUFA	TSFA /TUFA
C11A21	0.02 ± 0	9.05 ± 0.06 a	0.068 ± 0 c	0.045 ± 0	-	2.594 ± 0.1 d	13.438 ± 0.12 c	34.51 ± 0.04 a	40.188 ± 0.2 c	0.094 ± 0	0.119 ± 0 *	13.624 ± 0.1 b	74.702 ± 0.19 a	11.802 ± 0.14	88.326 ± 0.06 a	0.182 ± 0 c	0.134 ± 0 a
Bourjassotte Noir	0.017 ± 0	8.658 ± 0.02 c	0.086 ± 0 b	0.036 ± 0.01	-	3.148 ± 0.07 b	15.642 ± 0.02 a	29.465 ± 0.03 c	42.837 ± 0.07 b	0.099 ± 0 a	0.038 ± 0	15.766 ± 0.01 a	72.302 ± 0.1 b	11.959 ± 0.1 a	88.068 ± 0.09	0.218 ± 0 a	0.136 ± 0 b
C7A14	0.022 ± 0	8.539 ± 0.04 d	0.059 ± 0 c	0.048 ± 0	0.036 ± 0	3.302 ± 0 a	15.379 ± 0.01 b	33.866 ± 0.01 b	38.436 ± 0.01 c	0.066 ± 0	0.195 ± 0 *	15.669 ± 0.01 a	72.303 ± 0 b	11.977 ± 0.04	87.972 ± 0 c	0.217 ± 0 a	0.136 ± 0 b
White Adriatic	0.022 ± 0	8.748 ± 0.04 b	0.162 ± 0 a	0.053 ± 0.02	0.068 ± 0	2.988 ± 0 c	15.333 ± 0.03 b	28.905 ± 0.06 d	43.573 ± 0.04 a	0.093 ± 0.01	0.096 ± 0 *	15.659 ± 0.04 a	72.478 ± 0.02 b	11.904 ± 0.02	88.137 ± 0.06 d	0.216 ± 0 a	0.135 ± 0 ab
Mean	0.02 ± 0.03	8.75 ± 0.21	0.09 ± 0.04	0.046 ± 0.01	0.052 ± 0.01	3 ± 0.3	14.95 ± 0.94	31.69 ± 2.7	41.26 ± 2.2	0.09 ± 0.04	0.11 ± 0.06	15.18 ± 0.18	72.95 ± 1.1	11.91 ± 0.12	88.12 ± 0.15	0.21 ± 0.01	0.135 ± 0.002
ANOVA mean square	0ns	0.143 ***	0.007 ***	0ns	0.001 ***	0.278 ***	3.097 ***	25.419 ***	16.958 ***	0.001ns	0.127 ***	3.234 ***	4.132 ***	0.019 ns	0.067 **	0.001 ***	0ns

MUFA: Acides gras monoinsaturés ; PUFA: Acides gras polyinsaturés ; TSFA: Acides gras saturés totaux ; TUFA: Acides gras insaturés totaux.

Différentes lettres (a-c) dans les colonnes représentent des différences statistiquement significatives entre les cultivars (ANOVA : test de Duncan, $p < 0,05$).

*** : indique une différence significative au niveau de 0,001

ns : non significatif

Tableau 49. Variation dans les ratios liés à : désaturation des acides gras (ODR et LDR) et ω -6/ ω -3 entre cultivars du figuier

Cultivars	ODR	LDR	ω -6/ ω -3
C11A21	0.85 ± 0 a	0.54 ± 0 c	0.86 ± 0.01 b
Bourjassotte Noir	0.82 ± 0 c	0.59 ± 0 b	0.69 ± 0 c
C7A14	0.82 ± 0 b	0.53 ± 0 d	0.88 ± 0 a
White Adriatic	0.83 ± 0 b	0.6 ± 0 a	0.66 ± 0 d
Moyenne	0.83 ± 0	0.565 ± 0	0.7725 ± 0
Carré moyen ANOVA	0.000***	0.004***	0.038***

ODR (oleic desaturation ratio): Ratio de désaturation oléique = $\frac{\%C18:1+\%C18:2}{\%C18:1+\%C18:2+\%C18:3}$;

LDR (linoleic desaturation ratio): Ratio de désaturation linoléique = $\frac{\%C18:3}{\%C18:2+\%C18:3}$;

ω -6/ ω -3 = 18: 2/18:3;

Les lettres (a-c) dans les colonnes représentent des différences statistiquement significatives entre les cultivars (ANOVA : test de Duncan, $p < 0,05$).

*** : indique une différence significative au niveau de 0,001

4. Teneur en polyphénols totaux et activité antioxydante

La teneur en polyphénols (PPT) totaux, l'activité antioxydante et la concentration maximale inhibitrice de 50% des radicaux libres (IC50) sont résumés dans la figure 64. Les PPT ont varié de 69,83 ± 13 chez Bourjassotte Noir, à 100,99 ± 12,8 mg GAE/100 g d'huile pour White Adriatic. Les huiles des clones locaux "C7A14" et "C11A21" ont présenté des teneurs moyennes respectives de 80,18 ± 3,02 et 88,55 ± 11,3 mg GAE/100 g d'huile. Ces résultats sont semblables à ceux rapportés par des travaux sur d'autres huiles de graines de fruits comme la figue de barbarie (48 ± 1- 89 ± 5 mg GAE/100g) (Chougui *et al.*, 2013). Soong & Barlow en 2004, ont par contre trouvé des valeurs très en deçà pour la mangue, l'avocat et le jacquier dont les niveaux respectifs sont 1,17 ± 0,13 ; 0,88 ± 0,02 et 27,7 ± 3,4 mg GAE/100 g d'huile.

L'essai de piégeage des radicaux libres de DPPH• a montré une activité antioxydante allant de 226,46 ± 11 (C7A14) à 294,36 ± 9,8 mg équivalent de Trolox / g d'huile (White Adriatic). Les cultivars "Bourjassotte Noir" et "C11A21" ont montré, quant à eux, des niveaux similaires avec des moyennes respectives de 246,27 ± 4,8 et 242,81 ± 8,2 mg équivalent de trolox / g d'huile (figure 64). Pour ce test, IC50 a été importante chez la variété "White Adriatic" (19,27 ± 1,15 mg/ml) suivie par "Bourjassotte Noir" (60,7 ± 7 mg/ml).

L'activité antiradicalaire selon le test ABTS, a révélé des niveaux largement inférieurs à ceux de la méthode DPPH. De même, IC50 relative au test ABTS a révélé des concentrations inférieures à celles obtenues par DPPH. En effet, La variété "Bourjassotte Noir" a enregistré le taux d'inhibition des radicaux ABTS•+ le plus élevé ($136,65 \pm 9$ mg équivalent trolox/g d'huile), suivi du cultivar "C11A21" ($34,29 \pm 2,6$ mg équivalent trolox/g d'huile). Les concentrations les plus faibles correspondent à "White Adriatic" ($22,65 \pm 1,2$ mg équivalent trolox/g d'huile) et "C7A14" ($31,87 \pm 1,39$ mg équivalent trolox/g d'huile). IC50 de l'essai ABTS a été faible chez la variété "White Adriatic" ($17,6 \pm 1,52$ mg/ml) et le clone local "C7A14" ($35,27 \pm 1,31$ mg/ml). En revanche, les concentrations les plus élevées ont été observées chez "Bourjassotte noire" et la "C11A21", dont les concentrations respectives ont été de $44,65 \pm 0,9$ et $35,3 \pm 1,1$ mg/ml (figure 64).

Ces différences peuvent, en particulier, dépendre du profil phénolique des huiles plutôt que de leurs concentrations totales en polyphénols. En effet, comme les extraits phénoliques contiennent un mélange de différents composés chimiques, il est très difficile d'attribuer l'activité de piégeage des radicaux d'un extrait total à un ou quelques principes actifs (Wu *et al.*, 2009). Outre les constituants majeurs, les constituants mineurs peuvent également contribuer de manière significative à l'activité antioxydante des extraits. Il a été d'ailleurs démontré dans cette étude, que l'huile de figue est riche en polyphénols et présente une activité importante de piégeage des radicaux libres par rapport aux résultats rapportés pour l'huile de figue de barbarie (Chougui *et al.*, 2013).

Dans des études antérieures, l'activité antioxydante, notamment par la méthode DPPH, est positivement et fortement corrélée avec les concentrations en acide oléique contenue dans l'huile. Par conséquent, on peut spéculer que les quantités élevées d'acide oléique monoinsaturé pourraient être la clé de la capacité antiradicalaire des lipides (Talcott *et al.*, 2005 ; Vermaak *et al.*, 2011). Pour autant que nous le sachions, c'est la première fois que l'activité phénolique et antioxydante totale est étudiée pour l'huile des graines des figes. Ces résultats pourraient constituer une introduction aux vertus de cette huile qui peuvent en faire une source naturelle d'antioxydants pour l'industrie alimentaire. D'autres recherches sur la composition chimique et les propriétés de l'huile de figue sont nécessaires pour évaluer son potentiel total.

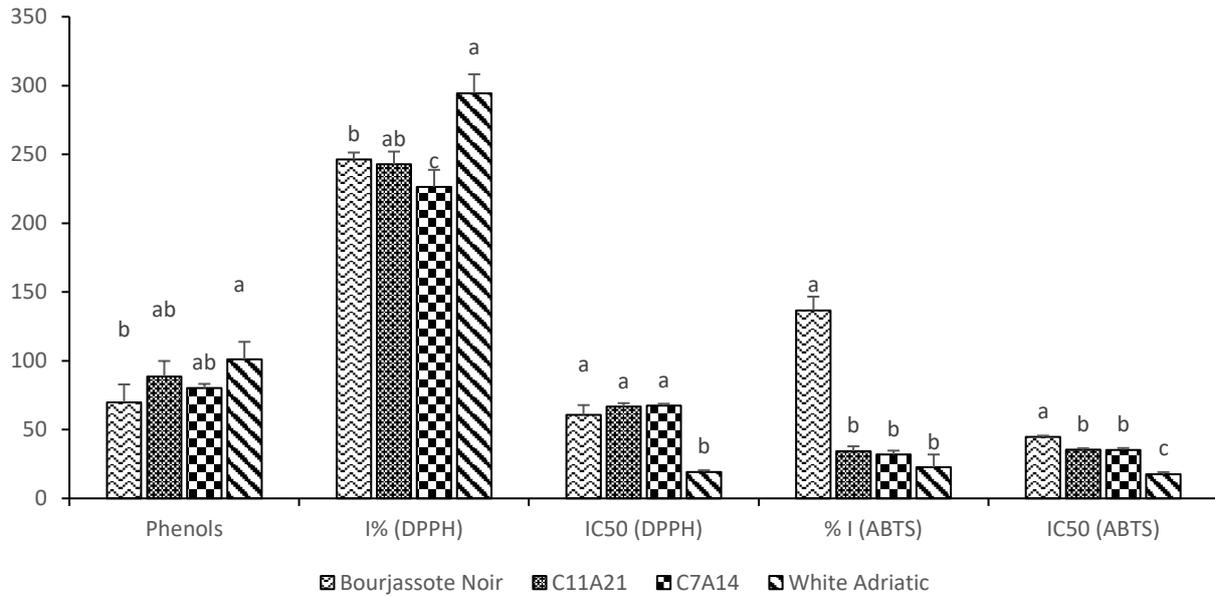


Figure 64. Teneurs en polyphénols totaux (mg GAE/100g d'huile), DPPH et ABTS (%) et de l'IC₅₀ (mg/mL) chez les cultivars du figuier (valeurs moyennes ± écart type). Les différences statistiquement significatives entre les cultivars sont exprimées selon le test de post-hoc Duncan (a-c).

5. Analyse spectrale des huiles des figes

L'importance de la spectroscopie infrarouge dans l'identification des structures moléculaires de l'huile de figue serait, en cas d'obtention d'une haute résolution d'analyse, une importante approche pour un travail de screening futur. C'est dans cette optique que les huiles extraites de quatre cultivars de figuier, ont été soumises à cette analyse afin d'évaluer la pertinence et la concordance avec les résultats biochimiques.

La figure 66 illustre les spectres infrarouges (IR) des huiles extraites. Les pics de chaque spectre IR sont attribuables à un groupement fonctionnelle spécifique (Bendini *et al.*, 2007). Visiblement, pour toutes les huiles, l'ensemble des spectres sont similaires. Cependant, moyennant des outils chimiométriques, l'analyse de ses spectres révèle des différences importantes. Ces différences, même si parfois considérées mineures, indiquent sur les dissimilitudes moléculaires entre les échantillons. Globalement, 11 pics ont été identifiés à différentes longueurs d'onde. Ces derniers représentent les empreintes moléculaires de l'huile de figue, attribuée chacune à des groupements fonctionnels (tableau 50). En effet, quatre pics aigus ont été identifiés à 2924, 2854, 1743 et 1159 cm⁻¹, dont les intensités respectives sont 0,15, 0,11, 0,19 et 0,13. Ces vibrations

sont attribuées à l'étirement asymétrique et symétrique du groupe méthylène des lipides (-CH₂), à la vibration des esters carbonyles des triglycérides et à l'étirement C-O du groupe acétyles (Adekunle *et al.*, 2010). D'autres pics dont l'intensité ne dépasse pas 0,1 sont également identifiés au niveau des huiles, et leurs groupements assignés sont décrits dans le tableau 50.

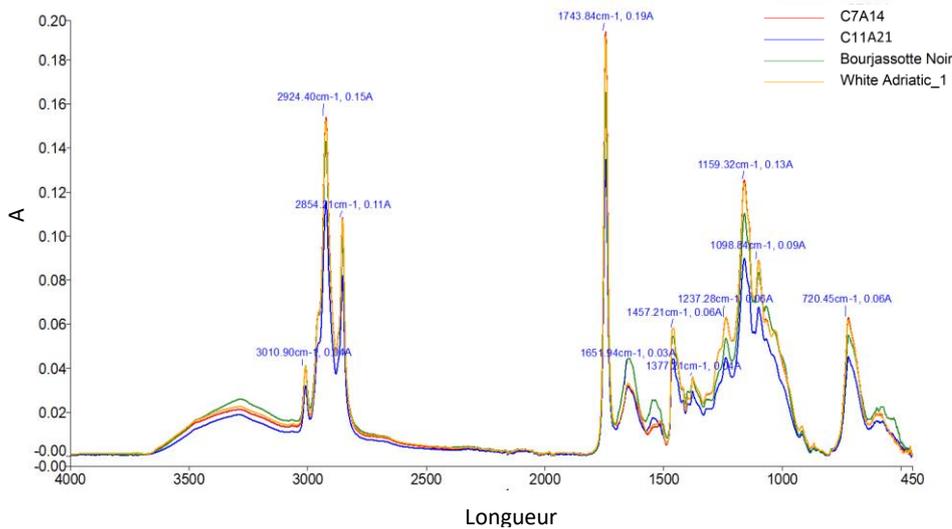


Figure 65. Spectres FTIR (450 – 4000 cm⁻¹) des huiles des graines de figues

Tableau 50. Groupes fonctionnels et modes de vibration dans le spectre IR des huiles de graines des figues

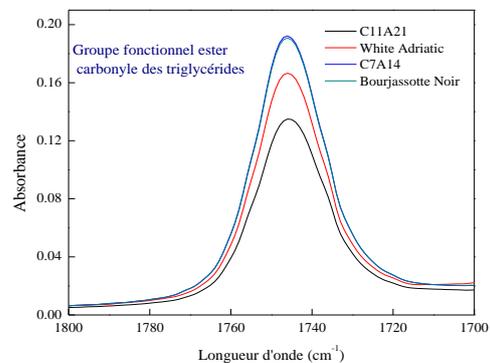
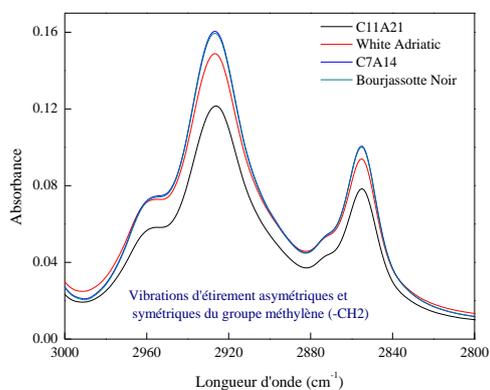
Fréquence du pic (cm ⁻¹)	Groupement fonctionnel assigné
3010,9	Étirement de la double liaison <i>cis</i>
2924,4 et 2854,21	Vibrations d'étirement asymétriques et symétriques du groupe méthylène (-CH ₂)
1743,84	Groupe fonctionnel ester carbonyle des triglycérides
1651,94	-α-Structure hélicoïdale de l'oméga-3 (ω-3)
1474,21	Vibrations de flexion des groupes aliphatiques CH ₂ et CH ₃
1377,2	Vibrations de flexion des groupes CH ₂
1237,28 et 1159,32	Étirement C-O
1098,84	Vibration d'étirement du groupe C-O ester
720,45	Chevauchement de la vibration de basculement du méthylène (-CH ₂) et de la vibration hors plan des alcènes <i>cis</i> -disubstitués

Références : Guillen et Cabo (1997), Lerma-Garcia *et al.* (2010) et Kumar *et al.* (2016)

Les pics ayant les intensités les plus importantes dans l'intervalle 3500-1000 cm⁻¹, sont analysés individuellement à l'aide du logiciel OriginLab Pro v 8.1 et présentés dans la figure 66. On constate que l'huile des figues est caractérisée par une absorbance forte et distincte à ~1740 cm⁻¹ résultant de la vibration et d'étirement des groupes ester C=O dans les lipides et les acides gras. Ceci, est en corrélation avec une absorbance également

accrue, mais en faible intensité, dans la région d'étirement C-H entre 3000 et 2800 cm^{-1} en raison des longues chaînes de carbone contenant un nombre relativement élevé des groupes CH_2 des acides gras.

Les pics relatifs aux vibrations des groupements méthyliques, des esters des triglycérides et les C-O des esters, affichent le même ordre d'intensité de ces vibrations dans l'huile. Il convient de noter que les intensités relatives à l'oméga 3 ont présenté le même ordre que les concentrations en cet acide déterminées par chromatographie gazeuse. Ainsi, La variété "White Adriatic" a affiché la teneur la plus élevée en acide linoléique suivie de la variété "Bourjassotte Noir", puis les clones locaux (C7A14 et C11A21). Ceci pourrait probablement renvoyer sur la sensibilité de la méthode ATR-FTIR dans l'analyse des huiles des figes. Dans la littérature, le traitement des huiles végétales par FTIR, s'est avéré parfaitement adapté en tant qu'outil de prédiction des changements et des réactions pouvant se produire lors du stockage ou procédé de transformation. Les avantages inhérents à la spectroscopie infrarouge, comme la simplicité, la haute résolution, la vitesse d'analyse et le faible coût, proposent ATR-FTIR comme méthode d'analyse puissante pour des fins de screening d'une large taille d'échantillon.



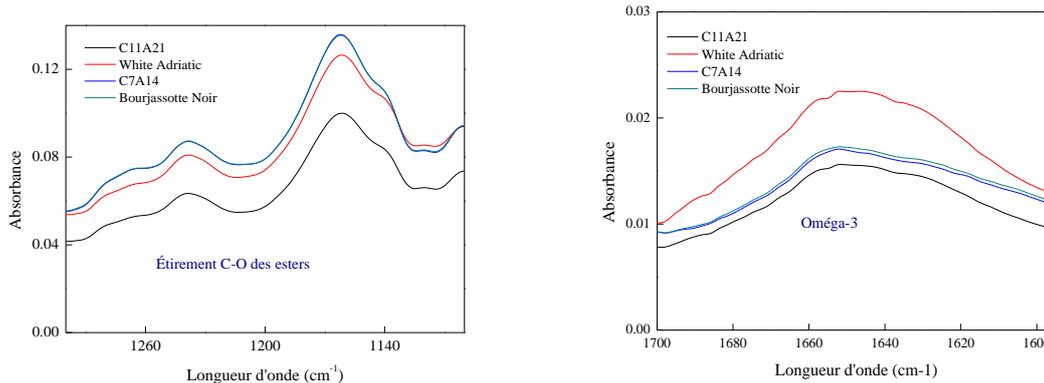


Figure 66. Spectres IR individuels des pics les plus intense dans l'intervalle de longueur d'onde de 3050-1000 cm^{-1}

6. Conclusion

Récemment, la recherche s'est orientée vers les possibilités d'exploiter de nouvelles sources d'huiles. Étant jusqu'à nos jours la partie la moins étudiée du fruit de la figue, les graines s'avèrent être une source importante d'huile au potentiel antioxydant important, avec des niveaux élevés en acides insaturés (87,9-88,3%). L'acide linoléique étant prédominant, suivi de l'acide linoléique. Les acides gras saturés les plus importants sont l'acide palmitique et l'acide stéarique. Des teneurs considérables en composés phénoliques totaux ont été trouvées dans tous les échantillons ($69,83 \pm 13$ - $100,99 \pm 12,8$ mg GAE/100 g).

De toute évidence, aucune huile ne peut répondre aux exigences ou remplir les normes du marché relatif aux oléagineux, de nos jours en plein essor. Néanmoins, les caractéristiques ainsi dévoilées, peuvent encourager l'industrie à explorer davantage les antioxydants naturels contenus dans l'huile de graines de la figue. Toutefois, d'autres études sont nécessaires pour étayer ces résultats. Pour autant que nous le sachions, c'est la première et l'unique étude qui a porté à la fois, sur les acides gras, les composés phénoliques totaux et les antioxydants de l'huile de graines de figue.

Conclusion générale & perspectives

Conclusion générale

Ce travail s'est architecturé sur une étude tridimensionnelle ayant cadré les aspects morpho-agronomiques, physico-biochimiques et industriel-technologiques du fruit du figuier et porte l'ambition de dévoiler, tout ou partie, l'énigme heurtant le développement de la figue et finit par l'exploration de nouvelles voix d'exploitation à grande valeur ajoutée pour un développement durable de l'espèce.

Pour comprendre les aspects morpho-agronomiques, colorimétriques et physico-chimiques, une large taille de cultivars (135) de figuier appartenant à une collection de 218 cultivars, a fait l'objet d'un criblage moyennant 52 descripteurs. Les résultats ont révélé une large variabilité phénotypique au sein du germoplasme étudié. Le poids du fruit, son calibre, les dimensions du pédoncule et celles du col, ainsi que la forme du fruit et les propriétés chromatiques de l'épiderme (L^* , c^* et h°) ont eu la plus grande contribution à la variance totale. Sur la base des analyses inférentielles, particulièrement CHA, les accessions ont été classées en cinq clusters homogènes et distincts. La variabilité phénotypique révélée au sein du matériel génétique couvert par l'étude, a été principalement attribuée au facteur génétique, étant donné que la conduite technique a été assurée dans les mêmes conditions édapho-climatiques.

Le second criblage a porté sur l'analyse des propriétés biochimiques et antioxydantes des figues fraîches à la maturité commerciale, en mettant en relief les corrélations potentielles entre elles et avec les coordonnées chromatiques, et ainsi permettre de reclasser les génotypes selon leurs profils biochimiques. Les paramètres concernés sont les propriétés chromatiques, la teneur totale en sucres solubles, polyphénols, flavonoïdes, anthocyanes, proanthocyanidines, et l'activité de piégeage des radicaux libres évaluée selon trois principes biochimiques (DPPH, ABTS et Blanchiment du β -carotène). Les résultats ont mis en évidence une variation génotypique spectaculaire. Les niveaux les plus élevés du pouvoir antioxydant et des concentrations en polyphénols et en anthocyanes totaux, ont été enregistrés par les figues à épidermes foncés. Les anthocyanes se sont révélés, selon le modèle de corrélation de Pearson, les principaux contributeurs à l'activité antiradicalaire, particulièrement selon la méthode DPPH. L'analyse inférentielle a montré que les coordonnées chromatiques, les flavonoïdes, les anthocyanes et l'activité antiradicalaire (DPPH) sont les variables principales dans la discrimination entre les cultivars. La classification hiérarchique

ascendante a, quant à elle, classé les génotypes en cinq groupes distincts différents de ceux révélés par le screening morpho-agronomique et physicochimique.

Le regroupement des résultats relatifs à tous les aspects précités a permis de restreindre le champ de l'étude à un nombre limité de cultivars représentatifs selon une approche statistique multivariée, après standardisation des données. Ladite approche a rendu possible l'exploration d'autres propriétés biochimiques plus pointues permettant de déceler davantage la discrimination entre les cultivars. L'analyse canonique a révélé une corrélation importante entre les variables morpho-agronomiques et biochimiques, avec une variance totale très hautement significative du modèle. En s'appuyant sur les résultats de la CHA incluant toutes les variables du screening morpho-agronomique et physico-biochimique de la collection, 25 cultivars plus prometteurs ont été sélectionnés des clusters contrastés. Ces derniers ont fait l'objet d'analyse par le proche infrarouge (ATR-FTIR) et la chromatographie à haute pression en phase liquide. La spectroscopie ATR-FTIR a permis d'identifier les empreintes biochimiques de la figue fraîche en montrant une variabilité importante. Couplée à l'analyse en composantes principales, la spectroscopie FTIR, qui techniquement a fait preuve d'une importante sensibilité et d'une pertinence, a révélé un pouvoir de discrimination élevé, particulièrement pour les épidermes des fruits. Elle a également montré que la région de vibration la plus importante en termes d'intensité est liée aux phénols. Ses résultats ont servi de guide pour la suite du travail relatif à la séparation de ses composés par chromatographie liquide. Les analyses par HPLC-DAD ont révélé plusieurs composés phénoliques appartenant aux flavonols, flavones, anthocyanidines et aux dérivés des acides hydroxycinnamiques et hydroxybenzoïques. Ces derniers ont été différemment répartis entre les pulpes et les épidermes des cultivars évalués, ce qui indique une différence remarquable dans la composition biochimique de ces deux compartiments du fruit. Les résultats ont également montré que les polyphénols, principalement les anthocyanes, sont localisés dans l'épiderme, alors que la pulpe, en revanche, n'en contient qu'une faible teneur. Globalement, les concentrations en composés phénoliques dans la pulpe ont représenté, en moyenne, moins de 20% par rapport à la composition globale de la figue entière. La catéchine, l'(-)-épicatéchine, l'acide chlorogénique, le cyanidine-3,5-diglucoside, le cyanidine-3-O-rutinoside, la quercétine et l'apigénine ont été les composés phénoliques les plus discriminants entre les cultivars à la fois pour l'épiderme et la pulpe. Sous la réserve d'une répétition, ses résultats peuvent être exploités et extrapolés à toute la

collection. Le présent travail fournit une base de données très riche à l'industrie et pourrait surtout contribuer dans l'orientation du choix variétal pour une valorisation post-récolte plus raisonnée.

L'étude des isothermes de la figue a été une phase préliminaire dans la compréhension de la cinétique de séchage convectif sous un séchoir hybride. Les résultats, d'une grande importance, ont mis en évidence plusieurs propriétés thermodynamiques caractéristiques de la figue. Les isothermes de sorption de la figue appartiennent au type II avec une boucle d'hystérésis de type H3. Il a été observé que l'amplitude de la boucle d'hystérésis était plus grande à des fortes températures. Ce phénomène d'hystérésis est probablement lié aux agrégats de particules en forme de plaques qui se produisent et donnent naissance à des pores en forme de fente. Les résultats ont également montré que la teneur en humidité d'équilibre augmente significativement lorsque l'humidité relative augmente et diminue proportionnellement avec l'humidité relative. De plus, la chaleur isostérique nette de sorption pour les deux variétés du figuier diminue fortement à des teneurs en humidité d'équilibre élevées. Cette diminution a été exprimée par une fonction polynomiale du troisième degré et a illustré la forte liaison entre l'eau et les échantillons. Ce paramètre a montré un effet variétal remarquable en termes de l'énergie nécessaire aux processus de désorption et d'adsorption. L'entropie différentielle de la sorption a également illustré cet effet variétal. Cette grandeur diminue à mesure que le taux d'humidité augmente. Finalement, les modèles Enderby et Peleg ont montré les meilleures prédictions des données expérimentales des isothermes de désorption pour "Sarilop" et "Kadota", respectivement. Ce travail a permis de prévoir les besoins en énergie et à déterminer les valeurs expérimentales d'activité de l'eau appropriée au conditionnement des figues sèches. En raison de leur forte teneur en eau initiale, ces valeurs ont été de 0,41 et 0.41 pour "Kadota" et "Sarilop" respectivement. Le travail relatif à la cinétique de séchage et sa modélisation, s'est fixé l'objectif d'étudier le comportement des figues à l'aide d'un séchoir hybride fonctionnant principalement par l'énergie solaire. En outre il visait à définir les besoins énergétiques selon un dispositif expérimental combinant trois niveaux de chaleur et deux vitesses de l'air et d'en déduire la courbe caractéristique pour la figue. Les résultats ont montré que l'influence de la température de l'air sur la variation de l'humidité en fonction du temps de séchage est plus importante que la vitesse. Toutefois, le temps requis pour

le séchage a pu être considérablement raccourci en combinant une température (80 °C) et une vitesse de l'air élevées (300 m³/h), où les caractéristiques physiques des échantillons étaient très importantes par rapport aux autres combinaisons. L'augmentation de la température de l'air à débit constant, a augmenté la diffusivité effective de l'humidité. Le lissage des courbes expérimentales de séchage réalisé par neuf modèles, a révélé que le modifié de "Handerson et Pabis" présente la meilleure prédiction. L'analyse de la variance (ANOVA) a révélé que le comportement des variétés testées était similaire. Finalement, la courbe caractéristique de séchage est un polynôme d'ordre 3 avec des coefficients de corrélation très élevés.

L'huile des graines de figes, de couleur jaune, a enregistré des niveaux pouvant atteindre 30%, ce qui est très prometteur. L'analyse par chromatographie en phase gazeuse révèle un taux d'insaturation très élevé de 88% en moyenne, avec dominance de l'acide linoléique. La désaturation des acides oléiques et linoléiques estimée par bioconversion a révélé des niveaux très importants. Ces huiles ont montré en outre une capacité antiradicalaire élevée par rapport à celle des graines d'autres fruits, particulièrement la figue de barbarie. Ces caractéristiques sont encourageantes pour l'industrie oléagineuse. La spectroscopie dans le proche infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) a permis d'identifier les empreintes moléculaires des huiles, ce qui renvoie vers une utilisation plus élargie de la technique dans un screening au sein d'une large taille d'échantillons, comme nouveau critère de variabilité chez l'espèce.

Cette thèse s'est fixé des hypothèses cadres qu'elle a vérifiées et des objectifs auxquels elle a répondu, moyennant les moyens offerts. Toutefois, partant de la conviction qu'aucun travail de recherche scientifique relatif à une thématique donnée, aussi important soit-il, n'est qu'une ébauche aux multiples limites, liées à la conception, à la méthodologie, ou autres, cette partie se veut élucider celles revêtant le plus d'ampleur :

- La collection évidemment incapable d'inclure toute la variabilité des agroécosystèmes marocains, même avec sa taille jugée importante, d'autres études similaires engageant inlassablement de nouveaux cultivars dans l'étude sont fortement souhaitables ;

- La variabilité étudiée est tributaire de la nature et du nombre de descripteurs impliqués et les techniques d'analyses empruntées. L'intégration de nouveaux descripteurs et techniques est fortement souhaitable ;

- Absence d'un référentiel national matérialisé par des études similaires pour confrontations des résultats.

La vérification des résultats passera inévitablement par étendre à d'autres années l'investigation sur une collection de taille plus large et dont la conduite sera assurée dans des agroécosystèmes différents.

Perspectives de recherche

Le travail portant l'ambition de contribuer au développement durable de l'espèce, s'est concentré sur la valorisation d'une collection en mettant en lumière l'importance de la diversité et les différentes potentialités agronomiques et biochimiques qu'elle présente. Toutefois, d'autres études qui concourent à dévoiler d'autres aspects complémentaires, permettra sans l'ombre d'aucune doute de rehausser cette valorisation et d'enrichir la littérature scientifique. Les perspectives sont ambitieuses.

L'étude de la diversité phénotypique par marqueurs moléculaires devrait être entreprise sur la même taille déchantillon afin de mieux déterminer les pools génétiques au sein de la collection et d'orienter davantage les programmes de sélection futures.

La pollinisation, processus primordial dans la qualité de la figue, est régie par la communication olfactive entre ce fruit et son pollinisateur. L'étude des propriétés morphologiques et biochimiques influencés par ce processus permettra un meilleur management de la qualité de ce fruit depuis le verger jusqu' à son exploitation finale.

L'étude de la cinétique du séchage et la modélisation des isothermes de la figue, devra être étendue sur plus de variétés et clones locaux afin de mettre, davantage, en lumière l'effet variétal sur ce processus. Ces aspects de transformation peuvent également être impliqués dans l'évaluation de l'impact de la pollinisation. Ce volet s'ouvre sur l'étude de la relation entre les conditions de séchage et les propriétés biochimiques et microbiologiques qui demeurent inexplorées dans les conditions marocaines, particulièrement le brunissement enzymatique et non enzymatique chez la figue sèche et le développement des mycotoxines. Afin de mieux mettre en exergue cette relation, le plan d'expérience peut être segmenté en impliquant des prétraitements moyennant des

agents anti-brunissement afin de substituer l'usage extensif des sulfites qui représente un réel danger à la santé du consommateur.

Également, pour les isothermes de sorption, il serait important d'étudier l'impact de la teneur initiale en eau avec des figues séchées à des teneurs d'eau déterminées (selon un plan d'expériences), afin d'évaluer l'impact des conditions initiales de répartitions de l'eau dans les cellules sur les propriétés thermodynamiques. La détente instantanée contrôlée (DIC) est une technique qui a, récemment, montré des avantages économiques (vitesse, coût) et qualitatifs (stérilisation, qualité organoleptique et biochimique). La durée et la nature de la détente semblent être d'une importance particulière pour l'étude des propriétés des diverses composantes de la figue sèche. Des essais concernant l'impact de la détente instantanée par comparaison à des détentes à durée plus importante et leur impact sur la structure, la qualité de la figue semble un sujet très important.

L'extraction de l'huile des graines de la figue et l'étude de ses propriétés biochimiques, permet également de s'ouvrir sur de nouvelles perspectives à grande valeur ajoutée pour l'espèce. Pour confirmer les résultats annoncés dans ce travail, une analyse plus approfondie et plus détaillée serait envisageable. Il serait, donc intéressant d'approfondir l'exploration de la qualité d'huile via ses indices, les teneurs en tocophérols, stérols et en fractions phénoliques. La mise en relief de l'effet variétal, aura à être examinée par l'étude de ses propriétés sur une large taille d'échantillons.

Finalement, pour l'ensemble des aspects de séchage et d'extraction de l'huile, Il serait important de rendre adéquate la voie d'exploitation des résultats obtenus au laboratoire à l'échelle de l'industrie. Il serait en outre impératif de décortiquer, pour ces procédés, l'impact économique et les composantes énergétiques et environnementales.

Références bibliographiques

- Abdenouri, N., Idlimam, A., & Kouhila, M. (2010). Sorption isotherms and thermodynamic properties of powdered milk. *Chemical Engineering Communications*, 197(8), 1109-1125.
- Achtak, H., Ater, M., Oukabli, A., Santoni, S., Kjellberg, F., & Khadari, B. (2010). Traditional agroecosystems as conservatories and incubators of cultivated plant varietal diversity: the case of fig (*Ficus carica* L.) in Morocco. *BMC plant biology*, 10(1), 28.
- Achtak, H., Oukabli, A., Ater, M., Santoni, S., Kjellberg, F., & Khadari, B. (2009). Microsatellite markers as reliable tools for fig cultivar identification. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 134(6), 624-631.
- Adekunle, K., Åkesson, D., & Skrifvars, M. (2010). Synthesis of reactive soybean oils for use as a biobased thermoset resin in structural natural fiber composites. *Journal of applied polymer science*, 115(6), 3137-3145.
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., & Arabhosseini, A. (2009). Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer. *Energy conversion and management*, 50(5), on cellulose nanoparticles and natural rubber latex by ATR/FTIR spectroscopy: The impact of reinforcement. *Polymer Composites*, 40(5), 2076-2087.1348-1355.
- Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S., & Madadlou, A. (2012). Energy and exergy analyses of the spray drying process of fish oil microencapsulation. *Biosystems Engineering*, 111(2), 229-241.
- Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S., & Madadlou, A. (2012). Energy and exergy analyses of the spray drying process of fish oil microencapsulation. *Biosystems Engineering*, 111(2), 229-241.
- Agrebi, F., Ghorbel, N., Bresson, S., Abbas, O., & Kallel, A. (2019). Study of nanocomposites based
- Ait Haddou, L., Blenzar, A., Messaoudi, Z., Van Damme, P., Boutkhil, S., & Et Boukdame, A. (2014). Effet du cultivar, du prétraitement et de la technique de séchage sur quelques paramètres physico-chimiques des figues séchées de sept cultivars locaux du figuier (*Ficus carica* L.) au Maroc. *European Journal of Scientific Research*, 121(4), 336-346.
- Ait Mohamed, L., Kouhila, M., Lahsasni, S., Jamali, A., Idlimam, A., Rhazi, M., Aghfir, M., and Mahrouz, M. (2005). Equilibrium moisture content and heat of sorption of *Gelidium sesquipedale*, J. *Stored Prod. Res.*, 41, 199–209.
- Ajayi IA, Oderinde RA, Ogunkoya BO, Egunyomi A, Taiwo VO. 2007. Chemical analysis and preliminary toxicological evaluation of *Garcinia mangostana* seeds and seed oil. *Food Chem* 101(3): 999-1004.
- Ajayi OB, Ajayi DD. 2009. Effect of oilseed diets on plasma lipid profile in albino rats. *Pak J Nutr* 8: 116-118.
- Akanbi, Taiwo, Remi, Charles, Sikiru, Adeyemi, Ademola, Djo, 2006. Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slice. *Journal of Food Engineering* 73, 157–163.
- Akpınar, E. K., Bicer, Y., & Cetinkaya, F. (2006). Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. *Journal of food engineering*, 75(3), 308-315.
- Akpınar, E., Midilli, A., & Bicer, Y. (2003). Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy conversion and management*, 44(10), 1689-1705.
- Aksoy U (1998) Why fig? An old taste and a new perspective. *Acta Hort* 480:25–26.

- Aksoy, U., G. Seferoglu, A. Misirli, S. Kara, M. Duzbastilar, S. Bulbul, H.Z. Can and N. Sahin (1992). Clonal selection in cv. Sarilop fig. Proc. 1st National Hort. Congress. (1): 545-548, Izmir (Turkey).
- Aksoy, U., H. Z. Can, A. Misirli and S. Kara (2003). Fig (*Ficus carica* L.) selection study for fresh market in western Turkey. Acta Horticulturae (605): 197-203.
- Aktas, T., & Polat, R. (2007). Changes in the drying characteristics and water activity values of selected pistachio cultivars during hot air drying. Journal of food process engineering, 30(5), 607-624.
- Alam, M. S., Delgado-Saborit, J. M., Stark, C., & Harrison, R. M. (2013). Using atmospheric measurements of PAH and quinone compounds at roadside and urban background sites to assess sources and reactivity. Atmospheric Environment, 77, 24-35.
- Albitar, N. (2010). Etude comparative des procédés de séchage couplés à la texturation par Détente Instantanée Contrôlée DIC, en termes de cinétique et de qualité nutritionnelle. Applications à la valorisation des déchets agro-industriels (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).
- Alfawaz MA. 2004. Chemical composition and oil characteristics of pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed kernels. *Food Sci Agric* 2(1): 5-18.
- Alfawaz, M. A. (2004). Chemical composition and oil characteristics of pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed kernels. Food Science and Agriculture, 2(1), 5-18.
- Aljane, F. & Ferchichi, A. (2009). Postharvest chemical properties and mineral contents of some fig (*Ficus carica* L.) cultivars in Tunisia. Journal Food Agriculture and Environment, 7, 209-212.
- Aljane, F., & Ferchichi, A. (2009). Postharvest chemical properties and mineral contents of some fig (*Ficus carica* L.) cultivars in Tunisia. J. Food Agric. Environ, 7(209), e212.
- Aljane, F., Ferchichi, A. & Boukhris, M. (2008). Pomological Characteristics Of Local Fig (*Ficus carica*) Cultivars In Southern Tunisia . Acta Hort. 798, 123-128.
- Aljane, F., Nahdi, S., & Essid, A. (2012). Genetic diversity of some accessions of Tunisian fig tree (*Ficus carica* L.) based in morphological and chemical traits. J Nat Prod Plant Resour 2:350–359.
- Aljane, F., Toumi, I., & Ferchichi, A. (2007). HPLC determination of sugars and atomic absorption analysis of mineral salts in fresh figs of Tunisian cultivars. African Journal of Biotechnology, 6(5), 599-602.
- Allaf, K., Mounir, S., & Allaf, T. (2012). Swell-drying: séchage et texturation par DIC des végétaux.
- Almajalia, D., Abdel-Ghanib, A. H., & Migdadia, H. (2012) Evaluation of genetic diversity among Jordanian fig germplasm accessions by morphological traits and ISSR markers. Sci Hortic 147, 8–19.
- Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. Food and Bioproducts Processing, 80(2), 118-128.
- Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2004). Water sorption isotherms of starch powders: Part 1: Mathematical description of experimental data. Journal of food Engineering, 61(3), 297-307.

- Alonzo-Macías, M., Cardador-Martínez, A., Mounir, S., Montejano-Gaitán, G., & Allaf, K. (2013). Comparative study of the effects of drying methods on antioxidant activity of dried strawberry (*Fragaria* Var. Camarosa). *Journal of Food Research*, 2(2), 92.
- Al-Saikhan, M. S., Howard, L. R., & Miller Jr, J. C. (1995). Antioxidant activity and total phenolics in different genotypes of potato (*Solanum tuberosum*, L.). *Journal of food science*, 60(2), 341-343.
- Anjam, K., Khadivi-Khub, A. & Sarkhosh, A. (2016). The Potential of Caprifig Genotypes for Sheltering *Blastophaga psenes* L. for Caprification of Edible Figs. *Erwerbs-Obstbau*, 59(1), pp.45-49.
- Anjos Sobrinho, A. dos; Pasqual, M.; Paiva, P. D. de O. (1998). Efeito de diferentes concentrações de BA sobre o desenvolvimento 'in vitro' de gemas apicais de figo. *Congr. Bras. Frut.* 347.
- Anjos, O., Campos, M. G., Ruiz, P. C., & Antunes, P. (2015). Application of FTIR-ATR spectroscopy to the quantification of sugar in honey. *Food chemistry*, 169, 218-223.
- Apostolopoulos, D., & Gilbert, S. G. (1990). Water sorption of coffee solubles by frontal inverse gas chromatography: thermodynamic considerations. *Journal of food Science*, 55(2), 475-487.
- Armstrong, W. P. (2006). Sex determination & life cycle of *Ficus carica*.
- Aronson, W. J., Glaspy, J. A., Reddy, S.T., Reese, D., Heber, D., & Bagga, D. (2001). Modulation of omega-3/omega-6 polyunsaturated ratios with dietary fish oils in men with prostate cancer. *Urology*, 58, 283-288.
- Arroyo-García, R., Ruiz-García, L., Bolling, L., Ocete, R., Lopez, M. A., Arnold, C., ... & Ibanez, J. (2006). Multiple origins of cultivated grapevine (*Vitis vinifera* L. ssp. *sativa*) based on chloroplast DNA polymorphisms. *Molecular ecology*, 15(12), 3707-3714.
- Arthey, D., & Ashist, P. R. (1996). Almacenamiento, Maduración y manipulación de Frutas. "Procesado de Frutas". Ed. Acibia, SA. Zaragoza, España, 43-66.
- Arvaniti, O. S., Samaras, Y., Gatidou, G., Thomaidis, N. S., & Stasinakis, A. S. (2019). Review on fresh and dried figs: Chemical analysis and occurrence of phytochemical compounds, antioxidant capacity and health effects. *Food Research International*, 119, 244-267.
- Ater, M., El Oualkadi, A., Ahtak, H., Oukabli, A., & Khadari, B. (2005, May). Diversity of the local varieties of the Fig tree in the North-Western Morocco. In III International Symposium on Fig, 798 (pp. 69-76).
- Ater, M., El Oualkadi, A., Ahtak, H., Oukabli, A., & Khadari, B. (2005, May). Diversity of the local varieties of the Fig tree in the North-Western Morocco. In III International Symposium on Fig, 798 (pp. 69-76).
- Ater, M., El Oualkadi, A., Ahtak, H., Oukabli, A., Khadari, B. (2008). Diversity of the local varieties of the fig tree in the north-western Morocco. *Acta Horticulturae* 798, 69-76.
- Ateyyeh, A. F., & Sadder, M. T. (2006). Growth pattern and fruit characteristics of six common fig (*Ficus carica* L.) cultivars in Jordan. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 2(2), 105-112.
- Atolani, O., Adeniyi, O., Kayode, O. O., & Adeosun, C. B. (2015). Direct preparation of fatty acid methyl esters and determination of *in vitro* antioxidant potential of lipid from fresh *Sebal causarium* Seed. *J Appl Pharm Sci* 5(03), 024-028.

- Awad, M. A., De Jager, A., & Van Westing, L. M. (2000). Flavonoid and chlorogenic acid levels in apple fruit: Characterisation of variation. *Scientia Horticulturae*, 83, 249–263.
- Babalís, S. J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., & Belessiotis, V. G. (2006). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering*, 75(2), 205-214.
- Babbitt, J. D. (1942). On the adsorption of water vapour by cellulose. *Canadian Journal of Research*, 20, 143–172.
- Bachir Bey, M., Richard, G., Meziat, L., Fauconnier, M. L., & Louaileche, H. (2017). Effects of sun-drying on physicochemical characteristics, phenolic composition and *in vitro* antioxidant activity of dark fig varieties. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), e13164.
- Badgujar, S. B., Patel, V. V., Bandivdekar, A. H., & Mahajan, R. T. (2014). Traditional uses, phytochemistry and pharmacology of *Ficus carica*: A review. *Pharmaceutical biology*, 52(11), 1487-1503.
- Badgujar, S., Patel, V., Bandivdekar, A. and Mahajan, R. (2014). Traditional uses, phytochemistry and pharmacology of *Ficus carica*: A review. *Pharmaceutical Biology*, 52(11), pp.1487-1503.
- Bahammou, Y., Tagnamas, Z., Lamharrar, A., & Idlimam, A. (2019). Thin-layer solar drying characteristics of Moroccan horehound leaves (*Marrubium vulgare* L.) under natural and forced convection solar drying. *Solar Energy*, 188, 958-969.
- Bahorun, T., Gressier, B., Trotin, F., *et al.* (1996). Oxygen species scavenging activity of phenolic extracts from hawthorn fresh plant organs and pharmaceutical preparations. *Arzneimittel-forschung* 46(11), 1086-1089.
- Baranauskas, A., Jasaitis, D., & Kareiva, A. (2002). Characterization of sol-gel process in the Y-Ba-Cu-O acetate-tartrate system using IR spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*, 28(2), 263-275.
- Barbosa, W., Campo-Dall’Orto, F. A., Ojima, M., Martins, F. P., Bovi, V., Castro, J. L. (1992). de. Produção de mudas da figueira ‘Roxo de Valinhos’ através da cultura *in vitro*. *O Agrônômico* 44,6–18.
- Barreira, J. C., Ferreira, I. C., Oliveira, M. B. P., & Pereira, J. A. (2008). Antioxidant activities of the extracts from chestnut flower, leaf, skins and fruit. *Food chemistry*, 107(3), 1106-1113.
- Bayouhdh, C., Labidi, R., Majdoub, A. & Mars, M. (2017). *In vitro* Propagation of Caprifig and Female Fig Varieties (*Ficus carica* L.) from Shoot-tips. [online] jast.modares.ac.ir. Available at: http://jast.modares.ac.ir/article_13476_0.html [Accessed 5 Nov. 2017].
- Beigi, M. (2016). Energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying. *Food Science and Technology*, 36(1), 145-150.
- Bejar, A. K., Mihoubi, N. B., & Kechaou, N. (2012). Moisture sorption isotherms - Experimental and mathematical investigations of orange () peel and leaves. *Citrus sinensis* Food Chemistry, 132(4), 1728-1735.
- Belarbi-Ouarkoub, S., Allaf, K., & Hamdi, A. (2008). Séchage d’oignon par DIC. *Revue des énergies renouvelables SMSTS’08 Alger* 97, 104.
- Belarbi-Ouarkoub, S., Allaf, K., & Hamdi, A. (2008). Séchage de l’oignon par DIC. *Revue des énergies renouvelables SMSTS’08 Alger* 97, 104.

- Belghit, A., Kouhila, M., Boutaleb, B.C. (2000) 'Experimental Study of Drying Kinetics by Forced Convection of Aromatic Plants'. *Energy Conversion and Management* 2000; Vol. 41. N°12. pp. 1303 - 1321.
- Bell, L.N., Labuza, T.P. (2000). *Practical Aspects of Moisture Sorption Isotherm Measurement and Use*, 2nd ed. AACC Egan Press, Egan, MN, pp. 22–26.
- Benavente-Garcia, O., Castillo, J., Lorente, J., Ortuño, A. D. R. J., & Del Rio, J. A. (2000). Antioxidant activity of phenolics extracted from *Olea europaea* L. leaves. *Food chemistry*, 68(4), 457-462.
- Bendini, A., Cerretani, L., Di virgilio, F., Belloni, P., Bonoli-Carbognin, M., & Lercker, G. (2007). Preliminary evaluation of the application of the FTIR spectroscopy to control the geographic origin and quality of virgin olive oils. *Journal of Food Quality*, 30, 424–437.
- Benettayeb, Z. E., Bencheikh, M., Setti, B., & Chaillou, S. (2017). Genetic diversity of Algerian fig (*Ficus carica* L.) cultivars based on morphological and quality traits. *The Horticultural Society of India (Regd.)*, 74(3), 311-316.
- Berg CC. (2003). Flora Malesiana precursor for the treatment of Moraceae 1, the main subdivision of Ficus, the subgenera. *Blumea* 48, 167–78.
- Berg, C.C. *Experientia* (1989) 45: 605. doi:10.1007/BF01975677.
- Beristain, C. I., Azuara, E., & Vernon-Carter, E. J. (2002). Effect of water activity on the stability to oxidation of spray-dried encapsulated orange peel oil using mesquite gum (*Prosopis juliflora*) as wall material. *Journal of Food Science*, 67, 206–211.
- Berk, Z. (2018). *Food process engineering and technology*. Academic press.
- Berry, S. K. (1980). Cyclopropene fatty acids in some Malaysian edible seeds and nuts: I. Durian (*Durio zibethinus*, Murr.). *Lipids* 15(6), 452-455.
- Bioletti, F. (1938). Outline of ampelography for the vinifera grapes in California. *Hilgardia*, 11(6), 227-293.
- Birmeta, G., Nybom, H., & Bekele, E. (2002). RAPD analysis of genetic diversity among clones of the Ethiopian crop plant *Ensete ventricosum*. *Euphytica*, 124(3), 315-325.
- Bizot, H., Riou, N., & Multon, J. L. (1987). Guide pratique pour la détermination des isothermes de sorption et de l'activité de l'eau. *Sci. Aliments*.
- Bizot, H., Riou, N., & Multon, J. L. (1987). Guide pratique pour la détermination des isothermes de sorption et de l'activité de l'eau. *Sci. Aliments*.
- Blahovec, J., & Yanniotis, S. (2009). Modified classification of sorption isotherms. *Journal of Food Engineering*, 91(1), 72-77.
- Bobone, Á. D. L. A. (1932). Contribuição para o estudo taxonómico da espécie *Ficus carica* L. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, Vol. 5 (2), p. 124.
- Bordignon-Luiz, M. T., Gauche, C., Gris, E. F., & Falcao, L. D. (2007). Colour stability of anthocyanins from Isabel grapes (*Vitis labrusca* L.) in model systems. *LWT-Food Science and Technology*, 40(4), 594-599.
- Borges, R. M., Ranganathan, Y., Krishnan, A., Ghara, M., & Pramanik, G. (2011). When should fig fruit produce volatiles? Pattern in a ripening process. *Acta Oecologica*, 37(6), 611-618.

- Bostan, S. Z., Islam, A., & Aygun, A. (1998). A study on pomological characteristics of local fig cultivars in northern Turkey. *Acta Horticulturae* 480, 71-74.
- Bouafif, H., Koubaa, A., Perré, P., Cloutier, A., & Riedl, B. (2008). Analysis of among-species variability in wood fiber surface using DRIFTS and XPS: Effects on esterification efficiency. *Journal of wood chemistry and technology*, 28(4), 296-315.
- Boucek, Z. (1988). Australasian Chalcidoidea (Hymenoptera). A biosystematic revision of genera of fourteen families, with a reclassification of species.
- Boughali, S., Benmoussa, H., Bouchekima, B., Mennouche, D., Bouguettaia, H., & Bechki, D. (2009). Crop drying by indirect active hybrid solar-Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. *Solar energy*, 83(12), 2223-2232.
- Boughida, N., & Messaoudi, Z. (2005, May). Morphological and Chemical Characterization of Ten Fig Cultivars Grown in Tadla Area, Morocco. In III International Symposium on Fig 798 (pp. 139-142).
- Bouyanfif, A., Liyanage, S., Hequet, E., Moustaid-Moussa, N., & Abidi, N. (2019). FTIR microspectroscopy reveals fatty acid-induced biochemical changes in *C. elegans*. *Vibrational Spectroscopy*, 102, 8-15.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C. L. W. T. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Sci Technol* 28(1), 25-30.
- Brum, G. R. (2001) Micropropagac,ãõ da figueira (*Ficus carica* L.) 'Roxo de Valinhos'. M.Sc. thesis. University of Lavras, Brazil.
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multi-molecular layers. *Journal of American Chemical Society*, 60, 309-319.
- Bucić-Kojić, A., Planinić, M., Tomas, S., Jokić, S., Mujić, I., Bilić, M., & Velić, D. (2011). Effect of extraction conditions on the extractability of phenolic compounds from lyophilised fig fruits (*Ficus carica* L.). *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 61(3), 195-199.
- Bushuk, W., & Winkler, C. A., 1957. Sorption water vapour on wheat flour, starch, and gluten. *Cereal Chemistry* 34, 73-86.
- Caldwell, C. R., Britz, S. J., & Mirecki, R. M. (2005). Effect of temperature, elevated carbon dioxide, and drought during seed development on the isoflavone content of dwarf soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] grown in controlled environments. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53(4), 1125-1129.
- Caliskan, O., Bayazit, S., Ilgin, M., & Karatas, N. (2017). Morphological diversity of caprifig (*Ficus carica* var. *caprificus*) accessions in the eastern Mediterranean region of Turkey: Potential utility for caprification. *Scientia Horticulturae*, 222, 46-56.
- Calzetta Resio, A. N., Tolaba, M. P., & Suarez, C. (2000). Some physical and thermal characteristics of amaranth starch Algunas propiedades físicas y térmicas del almidón de amaranto. *Food science and technology international*, 6(5), 371-378.
- Can, A. (2000). Drying kinetics of pumpkinseeds. *International Journal of energy research*, 24(11), 965-975.
- Can, H. Z., Misirli, A., Kara, S., Seferoglu, G., Sahin, N., & Aksoy, U. (2001, May). Fig (*Ficus carica* L.) selection study for fresh market in western Turkey. In II International Symposium on Fig 605 (pp. 197-203).

- Cano-Chauca, M., Ramos, A. M., Stringheta, P. C., & Pereira, J. A. (2004, August). Drying curves and water activity evaluation of dried banana. In *Drying 2004—Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, São Paulo, Brazil (pp. 22-25).
- Carneiro, H. C., Tonon, R. V., Grosso, C. R., & Hubinger, M. D. (2013). Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials. *Journal of Food Engineering*, 115(4), 443-451.
- Carvalho, I. S. D., Miranda, I., Pereira, H. (2006). Evaluation of oil composition of some crops suitable for human nutrition. *Ind Crop Prod* 24(1), 75-78.
- Cassani, L., Santos, M., Gerbino, E., del Rosario Moreira, M., & Gómez-Zavaglia, A. (2018). A combined approach of infrared spectroscopy and multivariate analysis for the simultaneous determination of sugars and fructans in strawberry juices during storage. *Journal of food science*, 83(3), 631-638.
- Cassini, A. S., Marczak, L. D. F., & Noreña, C. P. Z. (2006). Water adsorption isotherms of texturized soy protein. *Journal of Food Engineering*, 77(1), 194-199.
- Chai, K. F., Mohd Adzahan, N., Karim, R., Rukayadi, Y., & Ghazali, H. M. (2018). Characteristics of fat, and saponin and tannin contents of 11 varieties of rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) seed. *Int. J. Food Prop* 21(1), 1091-1106.
- Chalack, L., Chehade, A., Mattar, E., & Khadari, B., (2005). Morphological characterization of fig accessions cultivated in Lebanon. *Acta Hort.* 798, 54-61.
- Chandra, S., Khan, S., Avula, B., Lata, H., Yang, M. H., ElSohly, M. A., & Khan, I. A. (2014). Assessment of total phenolic and flavonoid content, antioxidant properties, and yield of aeroponically and conventionally grown leafy vegetables and fruit crops: A comparative study. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2014.
- Chatti, K., Saddoud, O., Salhi-Hannachi, A., Mars, M., Marrakchi, M., & Trifi, M. (2007). Analysis of genetic diversity and relationships in a Tunisian fig (*Ficus carica*) germplasm collection by random amplified microsatellite polymorphisms. *Journal of Integrative Plant Biology*, 49(3), 386-391.
- Chatti, K., Salhi-Hannachi, A., Mars, M., Marrakchi, M., Trifi, M., (2003). Analysis of genetic diversity of Tunisian fig tree cultivars (*Ficus carica* L.) using morphological characteristics. *Fruits* 59, 49-61.
- Cheftel J. C., & Cheftel H. (1977). *Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments*. Ed. Technique et documentation. Lavoisier, Paris, vol. 1, p 381
- Chen, B. H., & Chen, Y. Y. (1993). Stability of chlorophylls and carotenoids in sweet potato leaves during microwave cooking. *Journal of agricultural and food chemistry*, 41(8), 1315-1320.
- Chen, X., Ru, Y., Chen, F., Wang, X., Zhao, X., & Ao, Q. (2013). FTIR spectroscopic characterization of soy proteins obtained through AOT reverse micelles. *Food Hydrocolloids*, 31(2), 435-437.
- Cheng, G. W., & Breen, P. J. (1991). Activity of phenylalanine ammonia-lyase (PAL) and concentrations of anthocyanins and phenolics in developing strawberry fruit. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 116(5), 865-869.
- Chessa, I., & Nieddu, G. (1990). Caratteristiche del patrimonio genetico del fico in Sardegna. *Rivista di frutticoltura e di ortofloricoltura*, 52(7), 35-39.

- Chielle, D. P., Bertuol, D. A., Meili, L., Tanabe, E. H., & Dotto, G. L. (2016). Convective drying of papaya seeds (*Carica papaya* L.) and optimization of oil extraction. *Ind Crop Prod* 85, 221-228.
- Chougui, N., Tamendjari, A., Hamidj, W., Hallal, S., Barras, A., Richard, T., & Larbat, R. (2013). Oil composition and characterisation of phenolic compounds of *Opuntia ficus - indica* seeds. *Food Chem* 139(1-4), 796-803.
- Chowdhury, M. M. I., Huda, M. D., Hossain, M. A., & Hassan, M. S. (2006). Moisture sorption isotherms for mungbean (*Vigna radiata* L). *Journal of Food Engineering*, 74(4), 462-467.
- Chowdhury, M. M. I., Huda, M. D., Hossain, M. A., & Hassan, M. S. (2006). Moisture sorption isotherms for mungbean (*Vigna radiata* L). *Journal of Food Engineering*, 74(4), 462-467.
- Chua, K. J., & Chou, S. K. (2003). Low-cost drying methods for developing countries. *Trends in Food Science & Technology*, 14(12), 519-528.
- Chua, K. J., Chou, S. K., Hawlader, M. N. A., Mujumdar, A. S., & Ho, J. C. (2002). Modelling the moisture and temperature distribution within an agricultural product undergoing time-varying drying schemes. *Biosystems Engineering*, 81(1), 99-111.
- Chung, O., Jeong, S. G., Yu, S., & Kim, S. (2014). Thermal performance of organic PCMs/micronized silica composite for latent heat thermal energy storage. *Energy and Buildings*, 70, 180-185.
- Ciarmiello, L. F., Piccirillo, P., Carillo, P., De Luca, A., & Woodrow, P. (2015). Determination of the genetic relatedness of fig (*Ficus carica* L.) accessions using RAPD fingerprint and their agro-morphological characterization. *South African Journal of Botany*, 97, 40-47.
- Colaric, M., Veberic, R., Stampar, F., & Hudina, M. (2005). Evaluation of peach and nectarine fruit quality and correlations between sensory and chemical attributes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(15), 2611-2616.
- Condit, I. (1932). The structure and development of flowers in *Ficus carica* L.. 1st ed. Berkeley, Calif.: University of California Printing Office.
- Condit, I. (1955). Fig varieties: a monograph. *Hilgardia*, 23(11), 323-538.
- Condit, I. J. (1941). Fig Characteristics Useful in the Identification of Varieties. *Hilgardia*.14(1), 1-69.
- Condit, I. J. (1947). The fig. Waltham, *Chronica Botanica*.
- Condit, I. J. (1969). *Ficus: the exotic species*. University of California Div. Agri. Science, Berkeley.
- Corrêa, J. L. G., Ernesto, D. B., & de Mendonça, K. S. (2016). Pulsed vacuum osmotic dehydration of tomatoes: Sodium incorporation reduction and kinetics modeling. *LWT-Food Science and Technology*, 71, 17-24.
- Crane, J. C. (1948). Fruit growth of four fig varieties as measured by diameter and fresh weight. In *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci* (Vol. 52, pp. 237-244).
- Crane, J. C., & Baker, R. E. (1953, January). Growth comparisons of the fruits and fruitlets of figs and strawberries. In *PROCEEDINGS OF THE AMERICAN SOCIETY FOR HORTICULTURAL SCIENCE* (Vol. 62, No. DEC, pp. 257-260). 701 North Saint Asaph Street, Alexandria, Va 22314-1998: Amer Soc Horticultural Science.
- Crane, J. C., & Brown, J. G. (1950). Growth of the fig fruit, *Ficus carica* var. Mission. In *Proceedings. American Society for Horticultural Science* (Vol. 56, pp. 93-7).

- Cravotto, G., Orio, L., Gaudino, E. C., Martina, K., Tavor, D., & Wolfson, A. (2011). Efficient synthetic protocols in glycerol under heterogeneous catalysis. *ChemSusChem*, 4(8), 1130-1134.
- Crisosto, C. H., Bremer, V., Ferguson, L., & Crisosto, G. M. (2010). Evaluating quality attributes of four fresh fig (*Ficus carica* L.) cultivars harvested at two maturity stages. *HortScience*, 45(4), 707-710.
- Crisosto, C.H., Ferguson, L. y Bremer, V. (2011). Fig (*Ficus carica* L.), in: Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits. Yahia E E, ed. Cambridge, UK (pp. 134-158).
- Cui, Z. W., Shi-Ying Xu, Z.-W., Da-Wen Sun, Z.-W., (2004). Effect of microwave vacuum drying on the carotenoids retention of carrot slices and chlorophyll retention of Chinese chive leaves. *Drying Technology* 22 (3), 563-575.
- Çalışkan, O., & Polat, A. A. (2008). Fruit characteristics of fig cultivars and genotypes grown in Turkey. *Scientia horticulturae*, 115(4), 360-367.
- Çalışkan, O., & Polat, A. A. (2011). Phytochemical and antioxidant properties of selected fig (*Ficus carica* L.) accessions from the eastern Mediterranean region of Turkey. *Scientia Horticulturae*, 128(4), 473-478.
- Çalışkan, O., & Polat, A. A. (2012). Morphological diversity among fig (*Ficus carica* L.) accessions sampled from the Eastern Mediterranean Region of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 36(2), 179-193.
- Çelik, H., Özgen, M., Serçe, S., & Kaya, C. (2008). Phytochemical accumulation and antioxidant capacity at four maturity stages of cranberry fruit. *Scientia Horticulturae*, 117(4), 345-348.
- Dach (2002). Referenzwerte für die Nährstoffzufuhr (1st ed.). Umschau/Braus GmbH. FAO/WHO/UNU (1985). Energy and protein requirements. Report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation. WHO technical report series no. 724. Geneva: WHO.
- Darjazi, B. B. (2011). Morphological and pomological characteristics of fig (*Ficus carica* L.) cultivars from Varamin, Iran. *African Journal of Biotechnology*, 10(82), 19096-19105.
- Darvishi, H., Azadbakht, M., Rezaeiasl, A., & Farhang, A. (2013). Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 12(2), 121-127.
- Datta, A. K. (2001). Mathematical modeling of microwave processing of foods: An overview. In *Food Processing Operations Modeling* (pp. 150-190). CRC Press.
- Datwyler, S. L. & Weiblen, G. D. (2004). On the origin of the fig: phylogenetic relationships of Moraceae from NDHF sequences. *Journal of Biogeography*, 31, 767-777.
- Debib, A., Tir-Touil, A., Mothana, R. A., Meddah, B., & Sonnet, P. (2014). Phenolic Content, Antioxidant and Antimicrobial Activities of Two Fruit Varieties of Algerian *Ficus carica* L. *Journal of food biochemistry*, 38(2), 207-215.
- Del Caro, A., & Piga, A. (2007). Polyphenol composition of peel and pulp of two Italian fresh fig fruits cultivars (*Ficus carica* L.). *Eur Food Res Technol* 226(4), 715-719.
- Desa, W. N. M., Mohammad, M., & Fudholi, A. (2019). Review of drying technology of fig. *Trends in food science & technology*.
- Diamente, L. M., Munro, P. A., (1993). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy* 51, 271-276.

- Dicenta F, & Garcia J. E. (1992). Phenotypical correlations among some traits in almond. *J Genet Breed* 46, 241–246.
- Djordjevic, A., Canadanovic-Brunet, J. M., Vojinovic-Miloradov, M., & Bogdanovic, G. (2004). Antioxidant properties and hypothetic radical mechanism of fullereneol C60 (OH) 24. *Oxidation Communications*, 27(4), 806-812.
- Dong, D., Zhao, C., Zheng, W., Wang, W., Zhao, X., & Jiao, L. (2013). Analyzing strawberry spoilage via its volatile compounds using longpath fourier transform infrared spectroscopy. *Scientific reports*, 3, 2585.
- Douillard, C., & Guichard, E. (1990). The aroma of strawberry (*Fragaria ananassa*): Characterisation of some cultivars and influence of freezing. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 50(4), 517-531.
- Doymaz, I. (2009). Mathematical modelling of thin-layer drying of kiwifruit slices. *Journal of Food processing and preservation*, 33, 145-160.
- Doymaz, I., 2004. Pretreatment effect on sun drying kinetics of mulberry fruits. *Journal of Food Engineering* 65, 205–209.
- Doymaz, I., 2005. Sun drying of figs: an experimental study. *Journal of Food Engineering* 71, 403–407.
- Doymaz, İ. (2010). Evaluation of mathematical models for prediction of thin-layer drying of banana slices. *International Journal of Food Properties*, 13(3), 486-497.
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. T., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical chemistry*, 28(3), 350-356.
- Dueñas, M., Pérez-Alonso, J. J., Santos-Buelga, C., & Escribano-Bailón, T. (2008). Anthocyanin composition in fig (*Ficus carica* L.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 21(2), 107-115.
- Dufrénoy, M. L. (1934). Le Figuier en Californie. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 14(160), 1015-1018.
- Duke, R. K., Chebib, M., Hibbs, D. E., Mewett, K. N., & Johnston, G. A. (2004). Synthesis and resolution of 2-methyl analogues of GABA. *Tetrahedron: Asymmetry*, 15(11), 1745-1751.
- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1999). Review of solar - energy drying systems I : an overview of drying principles and theory. *Energy Conversion & Management*, 40, 615– 655.
- Ekechukwu, O. V. (1999). Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. *Energy conversion and management*, 40(6), 593-613.
- El-Shobaki, F. A., El-Bahay, A. M., Esmail, R. S. A., El-Megeid, A. A., & Esmail, N. S. (2010). Effect of figs fruit (*Ficus carica* L.) and its leaves on hyperglycemia in alloxan diabetic rats. *World J dairy & food Sci* 5(1), 47-57.
- Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441–464.
- Ercisli, S., Tosun, M., Karlidag, H., Dzubur, A., Hadziabulic, S., & Aliman, Y. (2012). Color and antioxidant characteristics of some fresh fig (*Ficus carica* L.) genotypes from Northeastern Turkey. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67(3), 271-276.

- Ersoy, N., Gozlekçi, S., & Kaynak, L. (2007). Changes in sugar contents of fig fruit (*Ficus carica* L. Cv. Bursa Siyahi) during development.
- Eselin, J., Santos, T., & Hébraud, M. (2018). Desiccation: an environmental and food industry stress that bacteria commonly face. *Food microbiology*, 69, 82-88.
- Essid, A., Aljane, F., & Ferchichi, A. (2017). Morphological characterization and pollen evaluation of some Tunisian ex situ planted caprifig (*Ficus carica* L.) ecotypes. *South African Journal of Botany*, 111, 134-143.
- Estelrich, H. D. (1990). Allocation du carbone chez une Graminée annuelle (*Bromus madritensis* L.) et une Graminée pérenne (*Bromus erectus* Hud.) cultivées sur deux sols de fertilité différente: importance de l'" effet rhizosphère" (Doctoral dissertation, Montpellier 2).
- Estelrich, Pedro. (1910). La higuera y su cultivo en Espana. Libr. Escolar, Palma de Majorca.
- European Union Commission. (1991). Regulation EEC 2568/91 on the characteristics of olive oil and olive pomace and their analytical methods. *OffJ Euro Comm L* 248.
- Fabra, M. J., Talens, P., Moraga, G., & Martínez-Navarrete, N. (2009). Sorption isotherm and state diagram of grapefruit as a tool to improve product processing and stability. *Journal of Food Engineering*, 93(1), 52-58.
- Faleh, E., Oliveira, A. P., Valentão, P., Ferchichi, A., Silva, B. M., & Andrade, P. B. (2012). Influence of Tunisian *Ficus carica* fruit variability in phenolic profiles and *in vitro* radical scavenging potential. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 22(6), 1282-1289.
- FAO/OMS. (1994). Documento de Trabajo sobre el Plombo. 26a Reunion del Comite Del Codex sobre Aditivos Contaminantes de los Alimentos. Febrero.
- FAOStat. (2016). FAO statistics database on the World Wide Web, 2016. <http://apps.fao.org/>.
- FAOStat. (2018). FAO statistics database on the World Wide Web, 2018. <http://apps.fao.org/>.
- Fasina, O., Ajibola, O. O., & Tyler, R. (1999). Thermodynamics of moisture sorption of winged bean seed and gari. *Journal of Food Process Engineering*, 22, 405-418.
- Favati F, Caporale G, & Bertuccioli M. (1994). Rapid determination of phenol content in extra virgin olive oil. *Grasas y Aceites* 45(1-2), 68-70.
- Ferguson, L., Michailides, T. J. & Shorey, H. H. (1990). The California Fig Industry, in *Horticultural Reviews*, Volume 12 (ed J. Janick), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781118060858.ch9.
- Fernández-León, M. F., Lozano, M., Ayuso, M. C., Fernández-León, A. M., & González-Gómez, D. (2010). Fast and accurate alternative UV-chemometric method for the determination of chlorophyll A and B in broccoli (*Brassica oleracea* Italica) and cabbage (*Brassica oleracea* Sabauda) plants. *Journal of Food Composition and Analysis*, 23(8), 809-813.
- Ferrara, E., & Papa, G. (2003). Evaluation of fig cultivars for breba crop. *Acta Horticulturae* (605), 91-93.
- Flaishman, M. A., Rodov, V., & Stover, E. (2008). The fig: botany, horticulture, and breeding. *Horticultural Reviews-Westport Then New York-*, 34, 113.
- Flores Domínguez, A. (1990). La Higuera. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 190 pp.

- Flynn, A., Moreiras, O., Stehle, P., Fletcher, R. J., Müller, D. J., & Rolland, V. (2003). Vitamins and minerals: a model for safe addition to foods. *European Journal of Nutrition*, 42(2), 118-130.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations. 2014. FAOSTAT database. (viewed: 26/04/2019). <http://faostat.fao.org>.
- Francis, F.J. (1980) 'Colour quality evaluation of horticultural crops', *HortScience*, Vol. 15, pp.58-59.
- Freiman, Z. E., Rodov, V., Yablovitz, Z., Horev, B., & Flaishman, M. A. (2012). Preharvest application of 1-methylcyclopropene inhibits ripening and improves keeping quality of 'Brown Turkey' figs (*Ficus carica* L.). *Scientia Horticulturae*, 138, 266-272.
- Freiman, Z., Rosianskey, Y., Dasmohapatra, R., Kamara, I. & Flaishman, M. (2015). The ambiguous ripening nature of the fig (*Ficus carica* L.) fruit: a gene-expression study of potential ripening regulators and ethylene-related genes. *Journal of Experimental Botany*, 66(11), pp.3309-3324.
- Freire, A. L., Ramos, C. L., da Costa Souza, P. N., Cardoso, M. G. B., & Schwan, R. F. (2017). Nondairy beverage produced by controlled fermentation with potential probiotic starter cultures of lactic acid bacteria and yeast. *International journal of food microbiology*, 248, 39-46.
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(1), 1-30.
- Gaaliche, B., Saddoud, O., & Mars, M. (2012). Morphological and pomological diversity of fig (*Ficus carica* L.) cultivars in northwest of Tunisia. *ISRN Agronomy*, 2012.
- Gaaliche, B., Trad, M., & Mars, M. (2011). Effect of pollination intensity, frequency and pollen source on fig (*Ficus carica* L.) productivity and fruit quality. *Scientia Horticulturae*, 130(4), 737-742.
- Gabas, A. L., Menegalli, F. C., & Telis-Romero, J. (2000). Water sorption enthalpy-entropy compensation based on isotherms of plum skin and pulp. *Journal of Food Science*, 65, 680-684.
- Gallali, Y. M., Abujnah, Y. S., & Bannani, F. K. (2000). Preservation of fruits and vegetables using solar drier: a comparative study of natural and solar drying, III; chemical analysis and sensory evaluation data of the dried samples (grapes, figs, tomatoes and onions). *Renewable Energy*, 19(1-2), 203-212.
- Gao, L., & Mazza, G. (1995). Characterization, quantitation, and distribution of anthocyanins and colorless phenolics in sweet cherries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43(2), 343-346.
- Garba, U., Kaur, S., Gurumayum, S., Rasane, P. (2015). Effect of hot water blanching time and drying temperature on the thin layer drying kinetics of and anthocyanin degradation in black carrot (*Daucus carota* L.) shreds. *Food Technol. Biotechnol.* 53, 324-330.
- García-Pérez, J. V., Cárcel, J. A., Clemente, G., & Mulet, A. (2008). Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. *LWT-Food Science and Technology*, 41(1), 18-25.

- Gebhardt, S., Lemar, L., Haytowitz, D., Pehrsson, P., Nickle, M., Showell, B., ... & Holden, J. (2008). USDA national nutrient database for standard reference, release 21. United States Department of Agriculture Agricultural Research Service.
- Genskowsky, E., Puente, L. A., Pérez-Álvarez, J. A., Fernández-López, J., Muñoz, L. A., & Viuda-Martos, M. (2016). Determination of polyphenolic profile, antioxidant activity and antibacterial properties of maqui [*Aristotelia chilensis* (Molina) Stuntz] a Chilean blackberry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(12), 4235-4242.
- Giancarla, V., Emilian, M., Mihaela, M., Iuliana, C., & Gabriela, G. (2017). STUDIES ON GENETIC VARIABILITY OF THE SPECIES *FICUS CARICA* L. IN WESTERN ROMANIA. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 17, 977-982.
- Gilliland, E. R., & Sherwood, T. K. (1933). The drying of solids VI. *Industrial Eng. Chem.* 25, 1134-1136.
- Jimeno, E. (2004). Compuestos fenolicos. Un analisis de sus beneficios para la salud. *OFFARM. Ambito Farmaceutico nutrition. Revista en internet*, 9-155.
- Giraldo, E., Viruel, M.A., López-Corrales, M., and Hormaza, J.I. (2005). Characterisation and cross-species transferability of microsatellites in the common fig (*Ficus carica* L.). *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 80(2), 217-224. <https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11511920>.
- Giri, S. K., & Prasad, S. (2007). Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of food engineering*, 78(2), 512-521.
- Goksu, E. I., Sumnu, G., & Esin, A. (2005). Effect of microwave on fluidized bed drying of macaroni beads. *Journal of Food Engineering*, 66(4), 463-468.
- Gonçalves, B., Landbo, A. K., Let, M., Silva, A. P., Rosa, E., & Meyer, A. S. (2004). Storage affects the phenolic profiles and antioxidant activities of cherries (*Prunus avium* L.) on human low-density lipoproteins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(9), 1013-1020.
- Górnaś, P., & Rudzińska, M. (2016). Seeds recovered from industry by-products of nine fruit species with a high potential utility as a source of unconventional oil for biodiesel and cosmetic and pharmaceutical sectors. *Ind Crops Prod*, 83, 329-338.
- Goula, A. M., Thymiatis, K., & Kaderides, K. (2016). Valorization of grape pomace: drying behavior and ultrasound extraction of phenolics. *Food and Bioproducts Processing*, 100, 132-144.
- Gozlekci, S. (2011). Pomological traits of fig (*Ficus carica* L.) genotypes collected in the West Mediterranean region in Turkey. *JAPS, Journal of Animal and Plant Sciences*, 21(4), 646-652.
- Gozlekci, S., Kafkas, E., & Ercisli, S. (2011). Volatile compounds determined by HS/GC-MS technique in peel and pulp of fig (*Ficus carica* L.) cultivars grown in Mediterranean region of Turkey. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 39(2), 105-108.
- Grassi G. (1991) *Il Fico. Manuale pratico*. REDA. 1-128.
- Graziani, G., D'argenio, G., Tuccillo, C., Loguercio, C., Ritieni, A., Morisco, F., ... & Romano, M. (2005). Apple polyphenol extracts prevent damage to human gastric epithelial cells in vitro and to rat gastric mucosa in vivo. *Gut*, 54(2), 193-200.
- Greenspan, L. (1977). Humidity fixed point of binary saturated aqueous solutions. *Journal of Research of National Bureau of Standards*, 81(a), 89-96.

- Grisson-Pigé, L., Hossaert-McKey, M., Greeff, J. M., & Bessière, J. M. (2002). Fig volatile compounds—a first comparative study. *Phytochemistry*, 61(1), 61-71.
- Guan, L., Collet, J. P., Mazowita, G., & Claydon, V. E. (2018). Autonomic nervous system and stress to predict secondary ischemic events after transient ischemic attack or minor stroke: possible implications of heart rate variability. *Frontiers in neurology*, 9, 90.
- Guasmi, F., Ferchichi, A., Fares, K., & Touil, L. (2006). Identification and differentiation of *Ficus carica* L. cultivars using inter simple sequence repeat markers. *African Journal of Biotechnology*, 5(15).
- Guerra, M., Costa, (1987). R.M.B.F.L. da. Micropropagaç,ãõ da figueira 'Roxo de Valinhos', atrave´s da cultura de meristemas. *Congr. Bras. Frut.* 465-467.
- Guillen, M. D., & Cabo, N. (1997). Characterization of edible oils and lard by Fourier transform infrared spectroscopy. Relationships between composition and frequency of concrete bands in the fingerprint region. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 74, 1281-1286.
- Gupta, R., Kumar, P., Sharma, A., Patil, R. (2011). Color kinetics of aonla shreds with amalgamated blanching during drying. *Inter J Food prop* 14, 1232-1240.
- Hakkinen, S., Heinonen, M., Karenlampi, S., Mykkanen, H., Ruuska- nen, J., & Torronen, R. (1999). Screening of selected flavonoids and phenolic acids in 19 berries. *Food Research International*, 32, 345-353.
- Halsey, G. (1948). Physical adsorption on non-uniform surfaces. *The Journal of chemical physics*, 16(10), 931-937.
- Hardy, O. J., & Vekemans, X. (2002). SPAGeDi: a versatile computer program to analyse spatial genetic structure at the individual or population levels. *Molecular ecology notes*, 2(4), 618-620.
- Harzallah, A., Bhouri, A. M., Amri, Z., Soltana, H., & Hammami, M. (2016). Phytochemical content and antioxidant activity of different fruit parts juices of three figs (*Ficus carica* L.) varieties grown in Tunisia. *Industrial Crops and Products*, 83, 255-267.
- Harzallah, A., Bhouri, A. M., Amri, Z., Soltana, H., & Hammami, M. (2016). Phytochemical content and antioxidant activity of different fruit parts juices of three figs (*Ficus carica* L.) varieties grown in Tunisia. *Industrial Crops and Products*, 83, 255-267.
- Henderson, C. R. (1974). General flexibility of linear model techniques for sire evaluation. *Journal of Dairy Science*, 57(8), 963-972.
- Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7, 85-89.
- Heyrovsky, J. (1970). Determination of isokinetic temperature. *Nature*, 227, 66-67.
- Hirst, K. (1996). Fig trees and archaeology. The history of the domestication of Fig trees. About.com Archaeology
- Hmimsa, Y. (2009). L'Agrodiversité de l'agrosystème à l'arbre: cas du Rif (nord du Maroc) (Doctoral dissertation, thèse ss dir. Ater Mohammed, Université Abdelmalek Essaadi).

- Hmimsa, Y., Aumeeruddy-Thomas, Y., & Ater, M. (2012). Vernacular taxonomy, classification and varietal diversity of fig (*Ficus carica* L.) among Jbala cultivators in northern Morocco. *Human Ecology*, 40(2), 301-313.
- Hmimsa, Y., Aumeeruddy-thomas, Y., & Ater, M. (2017). Une forme spontanée de figuier (*Ficus carica* L.), le nābūt. *Revue d'ethnoecologie*. <https://doi.org/10.4000/ethnoecologie.3186>
- Hornero-Méndez, D., Gómez-Ladrón de Guevara, R., & Mínguez-Mosquera, M. I. (2000). Carotenoid biosynthesis changes in five red pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars during ripening. Cultivar selection for breeding. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(9), 3857-3864.
- Hossaert-McKey, M., Gibernau, M. & Frey, J. (1994). Chemosensory attraction of fig wasps to substances produced by receptive figs. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 70(2), pp.185-191.
- Howell, A., Kalt, W., Duy, J. C., Forney, C. F., & McDonald, J. E. (2001). Horticultural factors affecting antioxidant capacity of blueberries and other small fruit. *HortTechnology*, 11(4), 523-528.
- Hssaini, L., Charafi, J., Hanine, H., Ennahli, S., Mekaoui, A., Mamouni, A., & Razouk, R. (2019). Comparative analysis and physio-biochemical screening of an ex-situ fig (*Ficus carica* L.) collection. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 60(5), 671-683.
- Hssaini, L., Hanine, H., Razouk, R., Ennahli, S., Mekaoui, A., Ejjilani, A., & Charafi, J. (2020). Assessment of genetic diversity in Moroccan fig (*Ficus carica* L.) collection by combining morphological and physicochemical descriptors. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 67(2), 457-474.
- Hu, F. B. (2001). The balance between ω -6 and ω -3 fatty acids and the risk of coronary heart disease. *Nutrition* 17, 741-742.
- Hui, Y. H. (Ed.). (2008). *Food drying science and technology: microbiology, chemistry, applications*. DEStech Publications, Inc.
- Iannone, A., Rota, C., Bergamini, S., Tomasi, A., & Canfield, L. M. (1998). Antioxidant activity of carotenoids: an electron-spin resonance study on β -carotene and lutein interaction with free radicals generated in a chemical system. *Journal of Biochemical and Molecular Toxicology*, 12(5), 299-304.
- Icyer, N. C., Toker, O. S., Karasu, S., Tornuk, F., Kahyaoglu, T., Arici, M. (2017). Microencapsulation of fig seed oil rich in polyunsaturated fatty acids by spray drying. *J Food Meas Charact* 11(1), 50-57.
- Iezzoni, A. F., Pritts, M. P. (1991). Applications of principal components analysis to horticultural research. *HortScience* 26, 334-338.
- Iezzoni, A., Schmidt, H., Albertini, A. (1990). Cherries (*Prunus* spp.). In: Moore, J.N., Ballington, J.R. (Eds.), *Genetic Resources of Temperate Fruit and Nut Crops*. Intl. Soc. Hort. Sci., Wageningen, The Netherlands. pp. 110-173.
- Iglesias, H. A., & Chirife, J. (1976). Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. *International Journal of Food Science & Technology*, 11(2), 109-116.
- Ikegami, H., Nogata, H., Hirashima, K., Awamura, M., & Nakahara, T. (2009). Analysis of genetic diversity among European and Asian fig varieties (*Ficus carica* L.) using ISSR, RAPD, and SSR markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 56(2), 201-209.

- IPGRI & CIHEAM (2003) Descriptors for Figs. International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI), Rome, Italy, and
- Irfan, P. K., Vanjakshi, V., Prakash, M. K., Ravi, R., & Kudachikar, V. B. (2013). Calcium chloride extends the keeping quality of fig fruit (*Ficus carica* L.) during storage and shelf-life. *Postharvest Biology and Technology*, 82, 70-75.
- Itle, R. A., & Kabelka, E. A. (2009). Correlation between L* a* b* color space values and carotenoid content in pumpkins and squash (*Cucurbita* spp.). *HortScience*, 44(3), 633-637.
- Jamali, A., Kouhila, M., Mohamed, L. A., Idlimam, A., & Lamharrar, A. (2006). Moisture adsorption-desorption isotherms of *Citrus reticulata* leaves at three temperatures. *Journal of food engineering*, 77(1), 71-78.
- Janick, J. (2005). The origins of fruits, fruit growing and fruit breeding. *Plant Breeding Review*, 25: 255-321.
- Janick, J. (2006). *Ficus carica* fig. En: The encyclopedia of fruit and nuts. CAB International, 493-503.
- Jayaraman, K. S., & Das Gupta, D. K. (1992). Dehydration of fruits and vegetables-recent developments in principles and techniques. *Drying Technology*, 10(1), 1-50.
- Jayasena, V., & Cameron, I. (2008). ° Brix/acid ratio as a predictor of consumer acceptability of Crimson Seedless table grapes. *Journal of Food Quality*, 31(6), 736-750.
- Jeong, W., Lachance, P. (2001). Phytosterols and Fatty Acids in Fig (*Ficus carica*, var. Mission) Fruit and Tree Components. *J Food Sci* 66(2), 278-281.
- Jia, Z., Tang, M., & Wu, J. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food chem*, 64(4), 555-559.
- Jiménez, C. P. (2016). Comportamiento agronómico y estudio del punto óptimo de maduración nutricional y funcional de variedades de higuera interesantes para consumo en fresco (Doctoral dissertation, Universidad de Extremadura).
- Johnson, A. C., & Ali Al Mukhaini, E. M. (2016). Drying studies on peach and strawberry slices. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), 1141654.
- Joint FAO. 1994. Fats and oils in human nutrition: report of a joint expert consultation. In FAO Food and nutrition paper (No. 57). FAO.
- Jona, B. & Gribaudo, I. (1991). *Ficus* spp. In : *Biotechnology in Agriculture and Forestry*, Vol. 16, trees III (ed. by Y.P.S. Bajaj) : 76 - 93.
- Jones, Jr., J. B., Wolf, B., & Mills, H. A. (1991). *Plant analysis handbook. A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide.* Micro-Macro Publishing, Inc.
- Joseph, B., & Raj, S. J. (2011). Pharmacognostic and phytochemical properties of *Ficus carica* Linn—An overview. *International journal of pharmtech research*, 3(1), 8-12.
- Jousselin, E., Rasplus, J. Y., & Kjellberg, F. (2003). Convergence and coevolution in a mutualism: evidence from a molecular phylogeny of *Ficus*. *Evolution*, 57(6), 1255-1269.
- Jun, L. I., Tian, Y. Z., Sun, B. Y., Dan, Y. A. N. G., Chen, J. P., & Men, Q. M. (2012). Analysis on Volatile Constituents in Leaves and Fruits of *Ficus carica* by GC-MS. *Chinese Herbal Medicines*, 4(1), 63-69.

- Jung, J., Choi, S. C., Jung, S., Cho, B. K., Ahn, G. H., & Ryu, S. B. (2017). A transcriptome approach toward understanding fruit softening in persimmon. *Frontiers in plant science*, 8, 1556.
- Kabasakal, A. (1990). *Incir Yetistiriciligi*. TAV Press, Number 20, Yalova (Turkey).
- Kafkas, N. E., Kosar, M., Öz, A. T., & Mitchell, A. E. (2018). Advanced analytical methods for phenolics in fruits. *Journal of Food Quality*, 2018.
- Kakhniashvili, T. A., Kolesnik, A. A., Zherebin, Y. L., & Golubev, V. N. (1987). Liposoluble pigments of the fruit of *Ficus carica*. *Chemistry of Natural Compounds*, 22(4), 477-479.
- Kaleemullah, S., & Kailappan, R. (2004). Moisture sorption of red chillies. *Biosystems Engineering*, 88(1), 95-104.
- Kamiloglu, S., & Capanoglu, E. (2013). Investigating the in vitro bioaccessibility of polyphenols in fresh and sun-dried figs (*Ficus carica* L.). *International journal of food science & technology*, 48(12), 2621-2629.
- Kamiloglu, S., & Capanoglu, E. (2015). Polyphenol content in figs (*Ficus carica* L.): Effect of sun-drying. *International journal of food properties*, 18(3), 521-535.
- Kammoun Bejar, A., Boudhrioua Mihoubi, N., & Kechaou, N. (2012). Moisture sorption isotherms e experimental and mathematical investigations of orange (*Citrus sinensis*) peel and leaves. *Food Chemistry*, 132(4), 1728-1735.
- Kaur, D., Abas, A. A., Wani, Sogi, D. S., & Shivhare, U. S. (2006). Sorption isotherms and drying characteristics of tomato peel isolated from tomato pomace. *Drying Technology*, 24, 1515-1520.
- Khadari, B., & Kjellberg, F. (2009). Tracking the genetic signature to identify fig origins: insights for evolution before and during domestication processes. In *Acta Horticulturae (Forthcoming) IV International Symposium on Fig. Méknès, Morocco*.
- Khadari, B., & Oukabli, A. (2005). Caractérisation des variétés polyclonales marocaines de figuiers, *Ficus carica* L. *Fruits* 1(60), 47-54.
- Khadari, B., El Aabidine, A. Z., Grout, C., Sadok, I. B., Doligez, A., Moutier, N., ... & Costes, E. (2010). A genetic linkage map of olive based on amplified fragment length polymorphism, intersimple sequence repeat and simple sequence repeat markers. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 135(6), 548-555.
- Khadari, B., Grout, C., Santoni, S., & Kjellberg, F. (2005b). Contrasted genetic diversity and differentiation among Mediterranean populations of *Ficus carica* L.: A study using mtDNA RFLP. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 52(1), 97-109. <https://doi.org/10.1007/s10722-005-0290-4>
- Khadari, B., Oukabli, A., Ater, M., Mamouni, A., Roger, J. P., & Kjellberg, F. (2005c). Molecular characterization of Moroccan fig germplasm using intersimple sequence repeat and simple sequence repeat markers to establish a reference collection. *HortScience*, 40(1), 29-32.
- Khadari, B., Roger, J. P., Ater, M., Achtak, H., Oukabli, A., & Kjellberg, F. (2005a). Moroccan fig presents specific genetic resources: a high potential of local selection. In *III International Symposium on Fig 798 (pp. 33-37)*.
- Khadivi, A., Anjam, R., & Anjam, K. (2018). Morphological and pomological characterization of edible fig (*Ficus carica* L.) to select the superior trees. *Scientia Horticulturae*, 238, 66-74.

- Khadivi-Khub, A., & Anjam, K. (2014). Characterization and evaluation of male fig (caprifig) accessions in Iran. *Plant systematics and evolution*, 300(10), 2177-2189.
- Khatib, S., & Vaya, J. (2010). Fig, carob, pistachio, and health. In *Bioactive Foods in Promoting Health* (pp. 245-263). Academic Press.
- Khatib, S., & Vaya, J. (2010). Fig, carob, pistachio, and health. In *Bioactive Foods in Promoting Health* (pp. 245-263). Academic Press.
- Khoualdia, B., Ben-Ali, S., & Hannachi, A. (2018). Mass Transfer during Osmotic Dehydration of Tunisian Pomegranate Seeds and Effect of Blanching Pretreatment. *International Journal of Chemical Engineering*, 2018.
- Kim, K. M., Kim, M. Y., Yun, P. Y., Chandrasekhar, T., Lee, H. Y. & Song, P. S. (2007). Production of multiple shoots and plant regeneration from leaf segments of fig tree (*Ficus carica* L.). *Journal of Plant Biology*, 50(4), 440-446.
- Kingsly, R. P., Goyal, R. K., Manikantan, M. R., & Ilyas, S. M. (2007). Effects of pretreatments and drying air temperature on drying behaviour of peach slice. *International journal of food science & technology*, 42(1), 65-69.
- Kislev, M. E., Hartmann, A., & Bar-Yosef, O. (2006). Response to comment on " Early domesticated fig in the Jordan valley". *Science*, 314(5806), 1683-1683.
- Kizmaz, M., Kurt, B. K., Kargin, N. Ç., & Döner, E. (2019). Influenza, pneumococcal and herpes zoster vaccination rates among patients over 65 years of age, related factors, and their knowledge and attitudes. *Aging Clinical and Experimental Research*, 1-9.
- Kjellberg, F., Gouyon, P., Ibrahim, M., Raymond, M., & Valdeyron, G. (1987). The Stability of the Symbiosis between Dioecious Figs and Their Pollinators: A Study of *Ficus carica* L. and *Blastophaga psenes* L. *Evolution*, 41(4), p.693.
- Kong, F., & Singh, R. P. (2016). Chemical deterioration and physical instability of foods and beverages. In *The Stability and Shelf Life of Food* (pp. 43-76). Woodhead Publishing.
- Konyalıoğlu, S., Sağlam, H., & Kuvçak, B. (2005). α -tocopherol, flavonoid, and phenol contents and antioxidant activity of *Ficus carica*. leaves. *Pharmaceutical biology*, 43(8), 683-686.
- Kopsell, D. A., & Kopsell, D. E. (2010). Carotenoids in vegetables: biosynthesis, occurrence, impacts on human health, and potential for manipulation. In *Bioactive Foods in Promoting Health* (pp. 645-662). Academic Press.
- Kosseva, M. R. (2013). Functional food and nutraceuticals derived from food industry wastes. In *Food Industry Wastes* (pp. 103-120). Academic Press.
- Kouhila, M., Kechaou, N., Otmani, M., Fliyou, M., & Lahsasni, S. « Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of Moroccan *Eucalyptus globulus* ». *Drying Technology* 2002; Vol. 20, 2027-2039.
- Koukouch, A., Idrimam, A., Asbik, M., Sarh, B., Izrar, B., Bostyn, S., ... & Amine, A. (2017). Experimental determination of the effective moisture diffusivity and activation energy during convective solar drying of olive pomace waste. *Renewable energy*, 101, 565-574.
- Kousksou, T., Allouhi, A., Belattar, M., Jamil, A., El Rhafiki, T., Arid, A., & Zeraouli, Y. (2015). Renewable energy potential and national policy directions for sustainable development in Morocco. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 46-57.

- Kowalski, S. J., & Pawłowski, A. (2010). Modeling of kinetics in stationary and intermittent drying. *Drying Technology*, 28(8), 1023-1031.
- Koyuncu, M. A. (1998). A study on some fruits characteristics in local fig cultivars grown in Hilvan (Urfa, Southern Turkey). *Acta Horticulturae* (480): 83-86.
- Koyuncu, M. A., Bostan, S. Z., Islam, A. & Koyuncu, F. (1998). Investigations on physical and chemical characteristics in fig cultivars grown in Ordu. *Acta Horticulturae* (480), 87-90.
- Krausel, Richard. 1953. *Frankfurter Reigen. Natur und Volk* 83:80-86. Krezdorn A. H. and G. W. Adriance, 1961. Fig growing in the south. U. S. Dept. Agr., Agr. Handb. 196.
- Krokida, M. K., Karathanos, V. T., Maroulis, Z. B., & Marinou-Kouris, D., (2003). Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering* 59 (54), 391–403.
- Krokida, M. K., Tsami, E., & Maroulis, Z. B. (1998). Kinetics on color changes during drying of some fruits and vegetables. *Drying Technology*, 16(3/5), 667–685.
- Krug, R. R., Hunter, W. G., & Grieger, R. A. (1976). Enthalpy-entropy compensation. 1. Some fundamental statistical problems associated with the analysis of van't Hoff and Arrhenius data. *The Journal of Physical Chemistry*, 80(21), 2335-2341.
- Kuden, A. B. & Tanriver, E. (1998). Plant genetic resources and selection studies on figs in the east Mediterranean and south east Anatolia regions. *Acta Horticulturae* 480, 49-54.
- Kuden, A. B., Tanriver, E. & Kaska, N. (1995). Cukurova bolgesine onerilebilecek bazi incircesit ve klonlarinin saptanmasi. *Proc. 2nd National Hort. Congress*. 1, 663-667, Adana (Turkey).
- Kumar, S., Lahlali, R., Liu, X., & Karunakaran, C. (2016). Infrared spectroscopy combined with imaging: A new developing analytical tool in health and plant science. *Applied Spectroscopy Reviews*, 51(6), 466-483.
- Kumar, V., Radha, A., & Kumar Chitta, S. (1998). *In vitro* plant regeneration of fig (*Ficus carica* L. cv. gular) using apical buds from mature trees. *Plant Cell Reports*, 17(9), pp.717-720.
- Kuś, P. M., Congiu, F., Teper, D., Sroka, Z., Jerković, I., & Tuberoso, C. I. G. (2014). Antioxidant activity, color characteristics, total phenol content and general HPLC fingerprints of six Polish unifloral honey types. *LWT-Food Science and Technology*, 55(1), 124-130.
- La Massese, C. S., Deportes, L., Mercier, S., Roger, J. P. (1984) Les principaux ennemis du figuier : Le nematodes et les maladies. *Phytoma* 354, 39-41.
- Labuza, T. P. (1968). Sorption phenomena in foods. *Food Technology* II, 22, 263–272.
- Labuza, T. P. (1974). Interpretation of sorption data in relation to the state of constituent water. In *Water relation of food: proceedings of an International Symposium held in Glasgow*.
- Labuza, T. P. (1980). Enthalpy/entropy compensation in food reactions. *Food Technology* (USA).
- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., & Fliyou, M. (2003). Moisture sorption isotherms of prickly pear cladode (*Opuntia ficus indica*) at different temperatures, *Energy Convers. Manage.*, 44, 923–936.
- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Idlimam, A., & Jamali, A. (2004). Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). *Energy*, 29(2), 211-224.

- Lai, V. M. F., Lii, C. Y., Hung, W. L., & Lu, T. J. (2000). Kinetic compensation effect in depolymerisation of food polysaccharides. *Food Chemistry*, 68(3), 319-325.
- Laidler, K. J. (1959). Thermodynamics of ionization processes in aqueous solution. Part 1. General theory of substituent effects. *Transactions of the Faraday Society*, 55, 1725-1730.
- Lansky, E. & Paavilainen, H. (2011). *Figs*. 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press. 1p.
- Lansky, E. P., & Paavilainen, H. M. (2010). *Figs: the genus Ficus*. CRC Press.
- Lee, K. W., Kim, Y. J., Kim, D., Lee, H. J., & Lee, C. Y. (2003). Major phenolics in apple and their contribution to the total antioxidant capacity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 6516-6520.
- Leffer, J., Grunwald, E. (1963). *Rates and equilibria of organic reactions*. Wiley, New York
- Leopold, L. F., Leopold, N., Diehl, H. A., & Socaciu, C. (2011). Quantification of carbohydrates in fruit juices using FTIR spectroscopy and multivariate analysis. *Spectroscopy*, 26(2), 93-104.
- Lerma-Garcia, M. J., Ramis-Ramos, G., Herrero-Martinez, J. M., & Simo-Alfonso, E. F. (2010). Authentication of extra virgin olive oils by Fourier transform infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, 118, 78-83.
- Lewicki, P. P. (1997). The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms. *International journal of food science & technology*, 32(6), 553-557.
- Lianju, W., Weibin, M. K., Zhifeng, L. & Yelin, W. (2003). The production and research of fig (*Ficus carica* L.) in China. *Acta Horticulturae*, 605, 191-196.
- Lichtenthaler, H. K., Kuhn, G., Prenzel, U., Buschmann, C., & Meier, D. (1982). Adaptation of chloroplast-ultrastructure and of chlorophyll-protein levels to high-light and low-light growth conditions. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 37(5-6), 464-475.
- Lien, E. J., Ren, S., Bui, H. H., & Wang, R. (1999). Quantitative structure-activity relationship analysis of phenolic antioxidants. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(3-4), 285-294.
- Liu, L., & Guo, Q. X. (2001). Isokinetic relationship, isoequilibrium relationship, and enthalpy-entropy compensation. *Chemical Reviews*, 101(3), 673-696.
- Liu, M., Li, X. Q., Weber, C., Lee, C. Y., Brown, J., & Liu, R. H. (2002). Antioxidant and antiproliferative activities of raspberries. *Journal of agricultural and food chemistry*, 50(10), 2926-2930.
- López-Corrales, M., Gil, M., Pérez, F., Cortés, J., Serradilla, M.J. & Chomé, P. (2011). *Variedades de higuera. Descripción y Registro de Variedades*. Editado por Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. ISBN: 978-84-491-1103-7.
- López-Hernández, J., & Rodríguez-Bernaldo de Quirós, A. (2016). trans-Stilbenes in commercial grape juices: Quantification using HPLC approaches. *International journal of molecular sciences*, 17(10), 1769.
- Mabrouk, S. B., Benali, E., & Oueslati, H. (2012). Experimental study and numerical modelling of drying characteristics of apple slices. *Food and Bioproducts Processing*, 90(4), 719-728.
- Machado, C. A., Jouselin, E., Kjellberg, F., Compton, S. G. & Herre, E. A. (2001). Phylogenetic relationships, historical biogeography and character evolution of fig-pollinating wasps. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 268, 685-694.

- Machado, S., Ribeiro, R. & Schieber, A. (2010). Bioactive compounds in mango (*Mangifera indica* L.). En: Bioactive foods in promoting health: fruits and vegetables. Editorial: Academy Press.
- Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1996). Enthalpy- entropy compensation models for sorption and browning of garlic. *Journal of Food Engineering*, 28, 109–119.
- Madhiyanon, T., Phila, A., & Soponronnarit, S. (2009). Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut. *Applied Thermal Engineering*, 29(14-15), 2849-2854.
- Madhlopa, A., Ngwalo, G., (2007). Solar dryer with thermal storage and biomass back-up heater. *Solar Energy* 81, 449–462.
- Mahdavian, M., Lessani, H., Kuhi, M., Zare, H., Krami, M., & Tabatabaei, Z. (2006). Assessment of genetic diversity among different fig (*Ficus carica* L.) collection from Iran. *Acta Horti* 760:29–37.
- Makris, D. P., Boskou, G., & Andrikopoulos, N. K. (2007). Polyphenolic content and in vitro antioxidant characteristics of wine industry and other agri-food solid waste extracts. *Journal of Food Composition and Analysis*, 20(2), 125-132.
- Mamouni, A., Laghezali, M., Khadari, B., Roger, J. P., Kjellberg, F., Ater, M., & Oukabli, A. (2001, May). Genetic Variability in Moroccan Fig Cultivars (*Ficus carica* L.) Based on Morphological and Pomological Data. In II International Symposium on Fig 605 (pp. 311-318).
- Manian, R., Anusuya, N., Siddhuraju, P., & Manian, S. (2008). The antioxidant activity and free radical scavenging potential of two different solvent extracts of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntz, *Ficus bengalensis* L. and *Ficus racemosa* L. *Food chemistry*, 107(3), 1000-1007.
- Marini, F. (2013). *Chemometrics in food chemistry*. Newnes.
- Marinova, D., Ribarova, F., & Atanassova, M. (2005). Total phenolics and total flavonoids in Bulgarian fruits and vegetables. *Journal of the university of chemical technology and metallurgy*, 40(3), 255-260.
- Maroulis, Z. B., Tsami, E., Marinos-Kouris, D., & Saravacos, G. D. (1988). Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits. *Journal of Food Engineering*, 7(1), 63-78.
- Mars, M. (2001, May). Fig (*Ficus carica* L.) genetic resources and breeding. In II International Symposium on Fig 605 (pp. 19-27).
- Mars, M., Chatti, K., & Saddoud, O. (2008). Fig cultivation and genetic resources in Tunisia, an overview.
- Mars, M., Chebli, T., & Marrakchi, M. (1998). Multivariate analysis of fig (*Ficus carica* L.) germplasm in southern Tunisia. *Acta Horti* 480:75–81.
- Martínez-Flórez, S., González-Gallego, J., Culebras, J. M., & Tuñón, M. (2002). Los flavonoides: propiedades y acciones antioxidantes. *Nutrición hospitalaria*, 17(6), 271-278.
- Martínez-Madrid, M. C., Pretel, M. T., Romojaro, F., & Mula, M. S. (2001). Calidad en la poscosecha. *Horticultura internacional*, 1 20-35.
- Masek, A., Chrzescijanska, E., Kosmalka, A., & Zaborski, M. (2014). Characteristics of compounds in hops using cyclic voltammetry, UV–VIS, FTIR and GC–MS analysis. *Food chemistry*, 156, 353-361.

- Mathlouthi, M., & Rogé, B. (2003). Water vapour sorption isotherms and the caking of food powders. *Food chemistry*, 82(1), 61-71.
- Maurer, C., & Peterka, R. J. (2005). A new interpretation of spontaneous sway measures based on a simple model of human postural control. *Journal of neurophysiology*, 93(1), 189-200.
- Mauri, N. (1939a). Les caprifiguiers utilises en Kabylie pour la caprification. *Algerie Serv Arbor. Bul.* 6:3-39.
- Mauri, N. (1939b). Les figuiers cultivés en Kabylie. *Algérie Serv. de l'Arbor. Bul.(ns)*, 5, 1-66.
- Mawa, S., Husain, K., & Jantan, I. (2013). *Ficus carica* L. (Moraceae): phytochemistry, traditional uses and biological activities. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2013.
- McBeth, C.W. (1949). Nematodes affecting figs. 3rd Annual Research Conference of the California Fig Institute Proceedings, pp. 16–17.
- Melgarejo Barreto, P. (2011). *Curso de derecho procesal penal*. Jurista Editores. Lima, 237.
- Melgarejo, P. (1998). *El Cultivo de la Higuera (Ficus carica L.)*. ed. A. Madrid 469 Vicente, IRAGRA, SA Madrid.
- Melgarejo, P., Hernandez, F., Martfnez, J. J., & Salazar, D. M. (2003). Organic acids and sugars from first and second crop fig juices. *Acta Hort.* 605, 237-239.
- Melgarejo, P., Salazar, D. M., & Artes, F. (2000). Organic acids and sugars composition of harvested pomegranate fruits. *European Food Research and Technology*, 211(3), 185-190.
- Melo Leote, F. C. (1900). *Arboricultura algarria*. (Cited by Bobone, 1932).
- Merrill, E. D. (1943). Some aspects of taxonomy. *Torrey* 43:50-64.
- Messaoudi, Z., & Haddadi, L. (2005, May). Morphological and chemical characterization of fourteen fig trees cultivated in Oulmes area, Morocco. In III International Symposium on Fig 798 (pp. 83-86).
- Metwali, E. M. R., Soliman, H. I. A., Howladar, S. M., Fuller, M. P., & Al-Zahrani, H. S. (2016). Appraisal of in vitro drought stress among three different cultivars of fig ('*Ficus carica*'L.) using RAPD and ISSR markers. *Plant Omics*, 9(1), 1.
- Michailides, T. J. (2003). 1 1 Diseases of Fig. *Diseases of tropical fruit crops*, 253.
- Michailides, T. J., Ogawa, J. M. & Ferguson, L. (1987). Investigations on the correlation of fig endosepsis on Calimyrna fig with caprifig infestations by *Fusarium moniliforme*. Fig Research Report. Crop Year 1987. University of California, pp. 1–25.
- Mikulic-Petkovsek, M., Schmitzer, V., Slatnar, A., Weber, N., Veberic, R., Stampar, F., ... & Koron, D. (2013a). Alteration of the content of primary and secondary metabolites in strawberry fruit by *Colletotrichum nymphaeae* infection. *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(25), 5987-5995.
- Mikulic-Petkovsek, M., Slatnar, A., Schmitzer, V., Stampar, F., Veberic, R., & Koron, D. (2013b). Chemical profile of black currant fruit modified by different degree of infection with black currant leaf spot. *Scientia Horticulturae*, 150, 399-409.

- Milbury, P. E., Chen, C. Y., Dolnikowski, G. G., & Blumberg, J. B. (2006). Determination of flavonoids and phenolics and their distribution in almonds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(14), 5027-5033.
- Miller, Philip. (1768). *The gardener's dictionary*. London, printed for the author.
- Ministère de l'agriculture, de la pêche maritime, du développement rural et des eaux et forêts (MAPMDREF), *Agricultures en chiffres 2016*, Editions 2017 .
- Mitra, S. K. (Ed.). (1997). *Postharvest physiology and storage of tropical and subtropical fruits* (No. 04; SB359, P6.). Wallingford: CAB international.
- Mohsenin, N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials*. New York: Gordon & Breach.
- Mopuri, R., & Islam, M. S. (2016). Antidiabetic and anti-obesity activity of *Ficus carica*: *In vitro* experimental studies. *Diabetes & Metabolism*, 42(4), 300.
- Moraes, M. A., Rosa, G. S., & Pinto, L. A. (2008). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of apple Fuji and garlic. *International journal of food science & technology*, 43(10), 1824-1831.
- Moreno, J., & Peinado, R. (2012). *Enological chemistry*. Academic Press.
- Morton, J. (1987) *Fruits of warm climates*, Fig (Julia F. Morton, Miami, FL), pp 47–50.
- Morton, J. F., & Dowling, C. F. (1987). *Fruits of warm climates* (Vol. 20534). Miami, FL: JF Morton.
- Morton, J. F., & Morton, J. F. (2004). *Fruits of Warm Climates*.
- Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., & Khoshtaghaza, M. H. (2014). Comparison of energy parameters in various dryers. *Energy Conversion and Management*, 87, 711-725.
- Mounir, S., Allaf, T., Mujumdar, A. S., & Allaf, K. (2012). Swell drying: Coupling instant controlled pressure drop DIC to standard convection drying processes to intensify transfer phenomena and improve quality—An overview. *Drying Technology*, 30(14), 1508-1531.
- Movasaghi, Z., Rehman, S., & ur Rehman, D. I. (2008). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of biological tissues. *Applied Spectroscopy Reviews*, 43(2), 134-179.
- Moyano, P. C., & Zuniga, R. N. (2004). Enthalpy–entropy compensation for browning of potato strips during deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*, 63, 57–62.
- Mujumdar, A. S. (1997). *Drying Fundamentals*. In: *Industrial Drying of Foods*. pp. 7–30. Baker, C.G.J. Eds., Chapman & Hall, London.
- Murithi, M., Rangan, T. S., & Waite, B. H. (1982). *In vitro* propagation of fig through shoot tip culture. *Hort Sci*, 17, 86-87.
- Mustayen, A. G. M. B., Mekhilef, S., & Saidur, R. (2014). Performance study of different solar dryers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 463-470.
- Myara, R., Taylor, M., & AL-Bulushi, I. (1996). Moisture sorption isotherms of Omani data. 10th international drying symposium. Kracow, Poland, July 29 August 3, 1996 (Vol. B, pp. 989–996). Lodz University Press.
- Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., Da Fonseca, G.A., and Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403(6772), 853.

- Naghavi, Z., Moheb, A., & Ziaei-Rad, S. (2010). Numerical simulation of rough rice drying in a deep-bed dryer using non-equilibrium model. *Energy Conversion and Management*, 51(2), 258-264.
- Naikwadi, P. M., Chavan, U. D., Pawar, V. D., & Amarowicz, R. (2010). Studies on dehydration of figs using different sugar syrup treatments. *J Food Sci Technol* 47(4), 442-445.
- Nakilcioğlu, E., & Hışıl, Y. (2013). Research on the phenolic compounds in Sarilop (*Ficus carica* L.) fig variety. *Gıda*, 38(5), 267-74.
- Nakilcioğlu, E., & Hışıl, Y. (2013). Research on the phenolic compounds in sarilop (*Ficus carica* L.) fig variety. *Gıda*, 38(5), 267-74.
- Nakilcioğlu-Taş, E. Biochemical Characterization of Fig (*Ficus carica* L.) Seeds. *J Agric Sci* 25(2): 232-237.
- Neeman, G., & Galil, J. (1978). SEED SET IN THE 'MALE SYCONIA' OF THE COMMON FIG *FICUS CARICA* L. (CAPRIFICUS). *New Phytologist*, 81(2), pp.375-380.
- Nguyen, C. H., Hanke, U., & Halvorsen, E. (2018). Actuation of Piezoelectric Layered Beams Withand Coupling. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 65(5), 815-827.
- Noort, S. V., & Compton, S. G. (1996). Convergent evolution of agaonine and sycoecine (Agaonidae, Chalcidoidea) head shape in response to the constraints of host fig morphology. *Journal of Biogeography*, 23(4), 415-424.
- Norman, P. E., Tongoona, P., & Shanahan, P. E. (2011). Determination of interrelationships among agr-morphological traits of yams (*Discorea* spp.) using correlation and factor analyses. *J Appl Biosci* 45, 3059–3070.
- Nowacka, M., Śledź, M., Wiktor, A., & Witrowa-Rajchert, D. (2014). Changes of radical scavenging activity and polyphenols content during storage of dried apples. *International Journal of Food Properties*, 17(6), 1317-1331.
- Nunes, R. V., & Rotstein, E. (1991). Thermodynamics of the water– foodstuff equilibrium. *Drying Technology*, 9, 113–117.
- O'Donnell, K., Cigelnik, E. & Nirenberg, H. I. (1998). Molecular systematics and phylogeography of the *Gibberella fujikuroi* species complex. *Mycologia* 90, 465–493.
- Oh, S. Y., Yoo, D. I., Shin, Y., Kim, H. C., Kim, H. Y., Chung, Y. S., ... & Youk, J. H. (2005). Crystalline structure analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide by means of X-ray diffraction and FTIR spectroscopy. *Carbohydrate research*, 340(15), 2376-2391.
- Okut, H., Akca, Y. (1995). Study to determine the causal relations between fruit weight and certain important fruit characteristics with using a path analysis. *Acta Hortic* 384, 97–102.
- Oliveira, A. P., Silva, L. R., de Pinho, P. G., Gil-Izquierdo, A., Valentão, P., Silva, B. M., ... & Andrade, P. B. (2010). Volatile profiling of *Ficus carica* varieties by HS-SPME and GC-IT-MS. *Food Chemistry*, 123(2), 548-557.
- Oliveira, A. P., Valentão, P., Pereira, J. A., Silva, B. M., Tavares, F. & Andrade. P. B. (2009). *Ficus carica* L.: Metabolic and biological screening. *Food Chemistry Toxicology*, 47, 2841-2846.

- Oomah, B. D., & Mazza, G. (1999). Health benefits of phytochemicals from selected Canadian crops. *Trends Food Sci Technol* 10(6-7), 193-198.
- Osborne, B. G. (2006). Near-infrared spectroscopy in food analysis. *Encyclopedia of analytical chemistry: applications, theory and instrumentation*.
- Ouaabou, R., Nabil, B., Hidar, N., Lahnine, L., Idlimam, A., Lamharrar, A., ... & Mahrouz, M. (2018). Valorization of solar drying process in the production of dried Moroccan sweet cherries. *Solar Energy*, 172, 158-164.
- Oukabli A., Mamouni A., Lahlou M., Mekaoui A. Alabou M., (2008). Fiche Technique *Ficus carica* L., Institut National de la Recherche Agronomique Maroc.
- Oukabli, A., & Mekaoui, A. (2012). Dormancy of fig cultivated under Moroccan conditions. *American Journal of Plant Sciences*, 3(4), 473.
- Oukabli, A., Mamouni, A., Laghezali, R., Khadari, B., Roger, J. P., Kjellberg, F., & Ater, M. (2003). Genetic variability in Moroccan fig cultivars (*Ficus carica*) based on morphological and pomological data. *Acta Hort*, 605, 311-318.
- Ozeker, E. & Isfendiyaroglu, M. (1998). Evaluation of table fig cultivars in Cesme peninsula. *Acta Horticulturae* (480), 55-60.
- Özeker, E., & Isfendiyaroglu, M. (1997, June). Evaluation of table fig cultivars in Cesme Peninsula. In I International Symposium on Fig 480 (pp. 55-60).
- Öztekin, S., Zorlugenç, B., & Zorlugenç, F. K. (2006). Effects of ozone treatment on microflora of dried figs. *Journal of food engineering*, 75(3), 396-399.
- Palmeira, C. M., Teodoro, J. S., Amorim, J. A., Steegborn, C., Sinclair, D. A., & Rolo, A. P. (2019). Mitohormesis and metabolic health: The interplay between ROS, cAMP and sirtuins. *Free radical biology and medicine*, 141, 483-491.
- Pande, G., & Akoh, C. C. (2010). Organic acids, antioxidant capacity, phenolic content and lipid characterisation of Georgia-grown underutilized fruit crops. *Food Chemistry*, 120(4), 1067-1075.
- Papadopoulou, K., Ehaliotis, C., Tourna, M., Kastani, P., Karydis, I., Zervakis, G. (2002). Genetic relatedness among dioecious *Ficus carica* L. cultivars by random amplified polymorphic DNA.
- Papadopoulou, O., Panagou, E. Z., Tassou, C. C., & Nychas, G. J. (2011). Contribution of Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy data on the quantitative determination of minced pork meat spoilage. *Food Research International*, 44(10), 3264-3271.
- Parker, K. C., Hamrick, J. L., Hodgson, W. C., Trapnell, D. W., Parker, A. J., & Kuzoff, R. K. (2007). Genetic consequences of pre-Columbian cultivation for *Agave murpheyi* and *A. delamateri* (Agavaceae). *American Journal of Botany*, 94(9), 1479-1490.
- Parry, J., Su, L., Luther, M., Zhou, K., Yurawecz, M. P., Whittaker, P., & Yu, L. (2005). Fatty acid composition and antioxidant properties of cold-pressed marionberry, boysenberry, red raspberry, and blueberry seed oils. *J Agric Food Chem* 53(3), 566-573.
- Pasquarella, C., Lauro, P., & D'Auria, G. (1978). FICO (*Ficus carica* L.). *Frutticoltura*. *Enciclopedia Agraria Italiana*. Stabilimento del Ramo Editoriale degli Agricoltori Roma. 591-9.

- Peleg, M. (1993). Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. *Journal of Food Process Engineering*, 16, 21–37.
- Peng, G., Chen, X., Wu, W., & Jiang, X. (2007). Modeling of water sorption isotherm for corn starch. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 562-567.
- Pereira Coutinho, A. (1913). *A flora de Portugal*. Aillaud et Cie, Paris. (Cited by Bobone).
- Pereira, C., López Corrales, M., Martín, A., Villalobos, M. D. C., Córdoba, M. D. G., & Serradilla, M. J. (2017). Physicochemical and nutritional characterization of brebas for fresh consumption from nine fig varieties (*Ficus carica* L.) grown in Extremadura (Spain). *Journal of Food Quality*, 2017..
- Pilando, L. and Woolstad, R.E. (1992). Compositional Profiles of Fruit Juice Concentrates and Sweeteners. *Food Chemistry*, 44. (19-27).
- Pilando, L., & Woolstad, R. E. (1992). Compositional profiles of fruit juice concentrates and sweeteners. *Food Chemistry*, 44(1), 19-27.
- Pinelo, M., Rubilar, M., Jerez, M., Sineiro, J., & Núñez, M. J. (2005). Effect of solvent, temperature, and solvent-to-solid ratio on the total phenolic content and antiradical activity of extracts from different components of grape pomace. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53(6), 2111-2117.
- Piotrowski, D., Lenart, A., & Wardzyński, A. (2004). Influence of osmotic dehydration on microwave-convective drying of frozen strawberries. *Journal of Food Engineering*, 65, 519–525.
- Pissarra, J., Mateus, N., Rivas-Gonzalo, J., Santos Buelga, C., & Freitas, V. (2003). Reaction between malvidin 3-glucoside and (+)-catechin in model solutions containing different aldehydes. *Journal of Food Science*, 68(2), 476-481.
- Podgornik, M., Vuk, I., Vrhovnik, I., & Bandelj, D. (2010). *Scientia Horticulturae* A survey and morphological evaluation of fig (*Ficus carica* L.) genetic resources from Slovenia. *Scientia Horticulturae*, 125(3), 380–389.
- Polat, A. A., & Caliskan, O. (2008). Fruit characteristics of table fig (*Ficus carica*) cultivars in subtropical climate conditions of the Mediterranean region. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 36(2), 107-115.
- Polat, A. A., & Çalışkan, O. (2017). Correlations among Important Fruit Quality and Plant Characteristics of Some Fig Genotypes. *Journal of Life Sciences*, 11, 141-144.
- Pontedera, G. (1720). *Anthologia, sive de flors natura*. Typ. Seminani, Patavii. 26, 230.
- Pontikis, C. A., & Melas, P. (1986) Micropropagation of *Ficus carica* L. *Hort Sci*, 21, 153.
- Popovski, D., & Mitrevski, V. (2004). Some new four parameter models for moisture sorption isotherms. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 3(3), 698-701.
- Porter, L. J., Hrstich, L. N., & Chan, B. G. (1985). The conversion of procyanidins and prodelphinidins to cyanidin and delphinidin. *Phytochemistry*, 25(1), 223-230.
- Pourghayoumi, M., Bakhshi, D., Rahemi, M., Noroozisharaf, A., Jafari, M., Salehi, M., ... & Hernandez, F. (2017). Phytochemical Attributes of Some Dried Fig (*Ficus carica* L.) Fruit Cultivars Grown in Iran, 81(3), 161–166.

- Prasad, N. B. L., Azeemoddin, G. (1994). Characteristics and composition of guava (*Psidium guajava* L.) seed and oil. *J Am Oil Chem' Soc* 71(4), 457-458.
- Pratt, C. (1990) Apple Trees: Morphology and Anatomy, in Horticultural Reviews, Volume 12 (ed J. Janick), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781118060858.ch6.
- Raghavi, L. M., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2018). Reflectance window drying of foods: A review. *Journal of food engineering*, 222, 267-275.
- Rahman, M. S. (2003). *Manual de Conservación de Alimentos*. 1 o Edic. Editorial ACRIBIA SA Zaragoza-España.
- Rahman, M. S. (Ed.). (2007). *Handbook of food preservation*. CRC press.
- Raihana, A. R., Marikkar, J., Amin, I., Shuhaimi, M. (2015). A Review on Food Values of Selected Tropical Fruits' Seeds. *Int J Food Prop* 18(11), 2380-2392.
- Raji, A. O., & Ojediran, J. O. (2011). Moisture sorption isotherms of two varieties of millet. *Food and bioproducts processing*, 89(3), 178-184.
- Ramulu, P., & Rao, P. U. (2003). Total, insoluble and soluble dietary fiber contents of Indian fruits. *Journal of food composition and analysis*, 16(6), 677-685.
- Raouzeos, G. S., & Saravacos, G. D. (1986). Solar drying of raising. *Drying Technology*, 4(4), 633-649.
- Rastogi NK, Niranjana K (2008) Enhanced mass transfer during osmotic dehydration of high pressure treated pineapple. *J Food Sci* 63:508–511
- Rastogi NK, Raghavarao KSMS (2004) Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: Considering Fickian diffusion in cubical configuration. *Lebens Wissen Technol* 37:43–47.
- Raymond, M. and Rousset, F. (1995). Genepop: population genetics software for exact test and ecumenicism. *Journal of Heredity* 86:248-249.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radic Biol Med* 26(9-10), 1231-1237.
- Reads, C. (2016). Agro-morphological diversity of traditional fig cultivars grown in Central-Western Spain, (October). <https://doi.org/10.2298/GENSR1602533P>
- Reid, L. M., Woodcock, T., O'Donnell, C. P., Kelly, J. D., & Downey, G. (2005). Differentiation of apple juice samples on the basis of heat treatment and variety using chemometric analysis of MIR and NIR data. *Food Research International*, 38(10), 1109-1115.
- Rekik, Y., Sahin, E., & Dallery, Y. (2008). Analysis of the impact of the RFID technology on reducing product misplacement errors at retail stores. *International Journal of Production Economics*, 112(1), 264-278.
- Ribeiro, S., Machado, R., & Andreas S. (2010). "Bioactive compounds in mango (*Mangifera indica* L.)." In *Bioactive foods in promoting health*, pp. 507-523. Academic Press, 2010.
- Riu-Aumatell, M., Castellari, M., López-Tamames, E., Galassi, S., & Buxaderas, S. (2004). Characterisation of volatile compounds of fruit juices and nectars by HS/SPME and GC/MS. *Food Chemistry*, 87(4), 627-637.

- Rival, L., and McKey, D. (2008). Domestication and diversity in manioc (*Manihot esculenta* Crantz ssp. *esculenta*, Euphorbiaceae). *Current Anthropol.* 49(6), 1119–1128. <https://doi.org/10.1086/593119>
- Roberts, J. S., Kidd, D. R., & Padilla-Zakour, O. (2008). Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering*, 89(4), 460-465.
- Rodolfi, M., Ganino, T., Chiancone, B., & Petruccioli, R. (2018). Identification and characterization of Italian common figs (*Ficus carica*) using nuclear microsatellite markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 65(5), 1337-1348.
- Rodov, V., Vinokur, Y., & Horev, B. (2012). Brief postharvest exposure to pulsed light stimulates coloration and anthocyanin accumulation in fig fruit (*Ficus carica* L.). *Postharvest biology and technology*, 68, 43-46.
- Rodrigues, M. G. F., Monteiro, L. N. H., Dos Santos, T. P., Pavan, B. E., & Conceição, A. (2018). Genetic variability in morphological characters among Fig tree accessions Fig genetic conservation. *Genetics and Molecular Research*, 17(4).
- Rodriguez-Saona, L. E., & Allendorf, M. E. (2011). Use of FTIR for rapid authentication and detection of adulteration of food. *Annual review of food science and technology*, 2, 467-483.
- Ronsted, N., Weiblen, G. D., Cook, J. M., Salamin, C., Machado, C. A. & Savolainen, V. (2005). 60 million years of co-divergence in the fig-wasp symbiosis. *Proceedings of the Royal Society of London B.* 272, 2593-2599.
- Rosianski, Y., Freiman, Z. E., Cochavi, S. M., Yablovitz, Z., Kerem, Z., & Flaishman, M. A. (2016). Advanced analysis of developmental and ripening characteristics of pollinated common-type fig (*Ficus carica* L.). *Scientia Horticulturae* 198, 98-106.
- Rothwell, J. A., Perez-Jimenez, J., Neveu, V., Medina-Rejon, A., M'Hiri, N., García-Lobato, P., ... & Scalbert, A. (2013). Phenol-Explorer 3.0: a major update of the Phenol-Explorer database to incorporate data on the effects of food processing on polyphenol content. *Database*, 2013
- Rouquerol, J., Rouquerol, F., Llewellyn, P., Maurin, G., & Sing, K. S. (2013). Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications. Academic press.
- Russo, F., Caporaso, N., Paduano, A., & Sacchi, R. (2014). Phenolic compounds in fresh and dried figs from Cilento (Italy), by considering breba crop and full crop, in comparison to Turkish and Greek dried figs. *Journal of food science*, 79(7), C1278-C1284.
- Rymbai, H., Srivastav, M., Sharma, R. R., & Singh, S. K. (2012). Lenticels on mango fruit: Origin, development, discoloration and prevention of their discoloration. *Scientia horticulturae*, 135, 164-170.
- Saddoud, O., Baraket, G., & Chatti, K. (2008) Morphological variability of fig (*Ficus carica* L.) cultivars. *Int J Fruit Sci* 8(1–2), 35–51.
- Saddoud, O., Baraket, G., & Chatti, K. (2011). Using morphological characters and simple sequence repeat (SSR) Markers to characterize Tunisian fig (*Ficus carica* L.) cultivars. *Acta Biologica Cracoviensia* 53(2), 7–14.
- Saddoud, O., Chatti, K., Salhi-Hannachi, A., Mars, M., Rhouma, A., Marrakchi, M., & Trifi, M. (2007). Genetic diversity of Tunisian figs (*Ficus carica* L.) as revealed by nuclear microsatellites. *Hereditas*, 144(4), 149-157.

- Sagar V. R., & Kumar P. S. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of food science and technology*, 47(1), 15-26.
- Sahin, S., & Sumnu, S. G. (2006). *Physical properties of foods*. Springer Science & Business Media.
- Sakai, N., Mao, W., Koshima, Y., & Watanabe, M. (2005). A method for developing model food system in microwave heating studies. *Journal of food engineering*, 66(4), 525-531.
- Salhi-Hannachi, A. M. E. L., Chatti, K., Saddoud, O., Mars, M., Rhouma, A., Marrakchi, M., & Trifi, M. (2006). Genetic diversity of different Tunisian fig (*Ficus carica* L.) collections revealed by RAPD fingerprints. *Hereditas*, 143(2006), 15-22.
- Salwin, H. (1959). Defining minimum moisture contents for dehydrated foods. *Food Technology*, 13(10), 594-595.
- Sanches, J., Melgarejo, P., Hemandz, F., & Martienz, J.J., (2002). *Acta Hort.* 605, 43-53. SAS® Procedures, Version 6, 3rd ed. SAS Institute, Cary, NC.
- Sanchez, M. J., Melgarejo, P., Hernandez, F. C. A. & Martinez, J. J. (2003). Chemical and morphological characterization of four fig tree cultivars (*Ficus carica* L.) grown under similar culture conditions. *Acta Horticulturae* (605), 33-36.
- Sanders, T. H., McMichael, R. W., & Hendrix, K. W. (2000). Occurrence of resveratrol in edible peanuts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 1243-1246.
- Santos, A. P. D., Bakhshandeh, A., Diehl, A., & Levin, Y. (2018). Adsorption isotherms of charged nanoparticles. arXiv preprint arXiv:1801.07468.
- Santos, G. T., Fortes, M., Amantea, R. P., Ferreira, W. R., & Martins, J. H. (2018). Irreversible thermodynamics analysis of ellipsoidal wheat kernel drying, aiming at the evaluation of phenomenological properties. *Drying Technology*, 36(9), 1117-1127.
- Sarker, S. D., & Nahar, L. (2015). Applications of high performance liquid chromatography in the analysis of herbal products. In *Evidence-Based Validation of Herbal Medicine* (pp. 405-425). Elsevier.
- Sata, Nagaharu T. (1944). A monographic study of the genus *Ficus* from the point of view of economic botany. *Inst. of Hort. and Econ. Bot., Taihoku Imp. Univ., Contrib. No. 32*.
- Schwanninger, M., Rodrigues, J. C., Pereira, H., & Hinterstoisser, B. (2004). Effects of short-time vibratory ball milling on the shape of FT-IR spectra of wood and cellulose. *Vibrational Spectroscopy*, 36(1), 23-40.
- Scott, W. J. (1957). Water relations of food spoilage microorganisms. In *Advances in food research* (Vol. 7, pp. 83-127). Academic Press.
- Sedaghat, S., & Rahemi, M. (2018). Effects of physio-chemical changes during fruit development on nutritional quality of fig (*Ficus carica* L. var. 'Sabz') under rain-fed condition. *Scientia Horticulturae*, 237, 44-50.
- Serradilla, M. J., Lozano, M., Bernalte, M. J., Ayuso, M. C., López-Corrales, M., & González-Gómez, D. (2011). Physicochemical and bioactive properties evolution during ripening of 'Ambrunés' sweet cherry cultivar. *LWT-Food Science and Technology*, 44(1), 199-205.
- Shafiur, M., & Rahman, M. (2003). *Manual de conservación de los alimentos*. Zaragoza: Editorial Acribia.

- Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects—A review. *Journal of functional foods*, 18, 820-897.
- Shahidi, F., & Chandrasekara, A. (2010). Hydroxycinnamates and their *in vitro* and *in vivo* antioxidant activities. *Phytochemistry Reviews*, 9(1), 147-170.
- Sharma, A., Chen, C. R., & Vu Lan, N. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1185-1210.
- Shen, X., Xu, L., Ye, S., Hu, R., Jin, L., Xu, H., & Liu, W. (2018). Automatic baseline correction method for the open-path Fourier transform infrared spectra by using simple iterative averaging. *Optics express*, 26(10), A609-A614.
- Sherwood, T. K. (1931). Application of the theoretical diffusion equations to the drying of solids. *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs*, 27, 190-202.
- Shinbo, Y., Niki, T., Taira, T., Ooe, H., Takahashi-Niki, K., Maita, C., ... & Ariga, H. (2006). Proper SUMO-1 conjugation is essential to DJ-1 to exert its full activities. *Cell Death & Differentiation*, 13(1), 96-108.
- Sies, H. (1997). Oxidative stress: oxidants and antioxidants. *Experimental Physiology: Translation and Integration*, 82(2), 291-295.
- Silva, W. P., Silva, C. M. D. P. S., Farias, V. S. O., & Gomes, J. P. (2010). Diffusion models to describe the drying process of peeled bananas: optimization and simulation, *Dry. Technol.* 30, 164-174.
- Simal, S., Femenia, A., Castell-Palou, Á., & Rosselló, C. (2007). Water desorption thermodynamic properties of pineapple. *Journal of Food Engineering*, 80(4), 1293-1301.
- Simopoulos, A. (2016). An increase in the omega-6/omega-3 fatty acid ratio increases the risk for obesity. *Nutrients* 8(3), 128.
- Simopoulos, A. P. (2002). The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids. *Biomed Pharmacother* 56(8), 365-379.
- Singh, D., Singh, B., & Goel, R. K. (2011). Traditional uses, phytochemistry and pharmacology of *Ficus religiosa*: A review. *J Ethnopharmacol* 134, 565-83.
- Singh, P., Shrivastava, V., & Kumar, A. (2018). Recent developments in greenhouse solar drying: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 82, 3250-3262.
- Singh, S., Raina, C. S., Bawa, A. S., & Saxena, D. C. (2006). Effect of pretreatments on drying and rehydration kinetics and color of sweet potato slices. *Drying Technology*, 24(11), 1487-1494.
- Skaar, C., & Babiak, M. (1982). A model for bound water transport in wood. *Wood Science and Technology*, 16, 123-138.
- Slatnar, A., Klancar, U., Stampar, F., & Veberic, R. (2011). Effect of Drying of Figs (*Ficus carica* L.) on the Contents of Sugars, Organic Acids, and Phenolic Compounds. *J Agric Food Chem* 59(21), 11696-11702.
- Slavin, J. L. (2006). Figs: Past, Present and Future. *Nutrition Today*, 41, 180-184.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2001). Introduction to chemical engineering thermodynamics. Boston: McGraw-Hill

- Solomon, A., Golubowicz, S., Yablowicz, Z., Grossman, S., Bergman, M., Gottlieb, H. E., ... & Flaishman, M. A. (2006). Antioxidant activities and anthocyanin content of fresh fruits of common fig (*Ficus carica* L.). *Journal of agricultural and food chemistry*, 54(20), 7717-7723.
- Solomon, A., Golubowicz, S., Yablowicz, Z., Grossman, S., Bergman, M., Gottlieb, H. E., ... & Flaishman, M. A. (2006). Antioxidant activities and anthocyanin content of fresh fruits of common fig (*Ficus carica* L.). *Journal of agricultural and food chemistry*, 54(20), 7717-7723.
- Song, S. Y., Kim, C. H., Im, S. J., & Kim, I. J. (2018). Discrimination of citrus fruits using FT-IR fingerprinting by quantitative prediction of bioactive compounds. *Food science and biotechnology*, 27(2), 367-374.
- Soni N, Mehta S, Satpathy G and Gupta R K (2014). Estimation of nutritional, phytochemical, antioxidant and antibacterial activity of dried fig (*Ficus carica*). *J Pharmacog Phytochem* 3 (2): 158-165.
- Soong, Y. Y., Barlow, P. J. (2004). Antioxidant activity and phenolic content of selected fruit seeds. *Food Chem* 88(3), 411-417.
- Souza, M., Jemni, M., Otón, M., Leonel, S., Melgarejo, P., & Artés, F. (2013). Caracterización morfológica, química y sensorial de cuatro variedades de brevas. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 14(1), 48-52.
- Starnes, H. N. & Monroe, J. F. (1907). The fig in Georgia. *Ga. Agr. Exp. Sta. Bul.* 77:41-101.
- Stinco, C. M., Rodríguez-Pulido, F. J., Escudero-Gilete, M. L., Gordillo, B., Vicario, I. M., & Meléndez-Martínez, A. J. (2013). Lycopene isomers in fresh and processed tomato products: Correlations with instrumental color measurements by digital image analysis and spectroradiometry. *Food research international*, 50(1), 111-120.
- Storey, W.B. (1975). Figs. In Janick J. and J. Moore (eds.), *Advances in fruit breeding*. Purdue Univ. Press. Indiana, 1975, 568 - 589.
- Stover, E., Aradhya, M., Ferguson, L. & Crisosto, C. H. (2007). The fig: Overview of an ancient fruit. *Hortscience*, 42, 1083-1087.
- Sugiyama, N., Roemer, K., & Bünemann, G. (1991). Sugar patterns of exotic fruits from the Hannover Market, Germany, FR. *Gartenbauwissenschaft* (Germany, FR).
- Sugiyama, N., Roemer, K., & Bünemann, G. (1991). Sugar Patterns of Exotic Fruits from the Hannover Market, Germany/Zuckermuster exotischer Früchte vom Markt Hannover. *Gartenbauwissenschaft*, 126-129.
- Sunthonvit N, Srzednicki G, Craske J (2007) Effects of drying treatments on the composition of volatile compounds in dried nectarines. *Dry Technol* 25:877-881.
- Şimşek, M. (2009). Fruit performances of the selected fig types in Turkey. *African Journal of Agricultural Research*, 4(11), 1260-1267.
- Taher, B. J., & Farid, M. M. (2001). Cyclic microwave thawing of frozen meat: experimental and theoretical investigation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 40(4), 379-389.
- Takeoka, G. R., & Dao, L. T. (2003). Antioxidant constituents of almond [*Prunus dulcis* (Mill.) DA Webb] hulls. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(2), 496-501.

- Talcott, S. T., Duncan, C. E., Del Pozo-Insfran, D., Gorbet, D. W. (2005). Polyphenolic and antioxidant changes during storage of normal, mid, and high oleic acid peanuts. *Food Chem* 89(1), 77-84.
- Tamboli, B. D., Sawale, D. D., Jagtap, P.B., Nimbalkar, R. U. & Teke, S. R. (2015). Effect of micronutrients on yield and fruit quality of fig on Inceptisol. *Indian J. Hort.* 72, 419-22.
- Taoufik, F., Zine, S., El Hadek, M., Idrissi Hassani, L. M., Gharby, S., Harhar, H., Matthäus, B. (2015). Oil content and main constituents of cactus seed oils *Opuntia ficus Indica* of different origin in Morocco. *Med J Nutr Metab* 8(2), 85-92.
- Tatemoto Y, Yano S, Mawatart Y, Noda K, Komatsu N (2007) Dry- ing characteristics of porous material immersed in a bed glass beads fluidized by superheated steam under reduced pressure. *Chem Eng Sci* 62:471-480.
- Teixeira, D. M., Canelas, V. C., do Canto, A. M., Teixeira, J. M. G., & Dias, C. B. (2009). HPLC-DAD quantification of phenolic compounds contributing to the antioxidant activity of *Maclura pomifera*, *Ficus carica* and *Ficus elastica* extracts. *Analytical letters*, 42(18), 2986-3003.
- Teixeira, D. M., Patão, R. F., Coelho, A. V., & da Costa, C. T. (2006). Comparison between sample disruption methods and solid-liquid extraction (SLE) to extract phenolic compounds from *Ficus carica* leaves. *Journal of Chromatography A*, 1103(1), 22-28.
- Teoman, S., Meryem, I. P. E. K., Erturk, U., TANGU, N. A., Durgut, E., Barut, E., ... & Ahmet, I. P. E. K. (2017). Assessment of Genetic Relationship among Male and Female Fig Genotypes Using Simple Sequence Repeat (SSR) Markers. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 45(1), 172-178.
- Tepe, B., Sokmen, M., Akpulat, H. A., & Sokmen, A. (2006). Screening of the antioxidant potentials of six *Salvia* species from Turkey. *Food Chemistry*, 95(2), 200-204.
- Terpugov, E. L., Degtyareva, O. V., & Savransky, V. V. (2016). Possibility of Light-Induced Mid-IR Emission in Situ Analysis of Plants. *Journal of Russian Laser Research*, 37(5), 507-510.
- Timmermann, E. O., Chirife, J., & Iglesias, H. A. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?. *Journal of food engineering*, 48(1), 19-31.
- Tolaba, M. P., Peltzer, M., Enriquez, N., & Pollio, M. L. (2004). Grain sorption equilibria of quinoa grains. *Journal of food engineering*, 61(3), 365-371.
- Tomás-Barberán, F. A., & Clifford, M. N. (2000). Dietary hydroxybenzoic acid derivatives-nature, occurrence and dietary burden. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(7), 1024-1032.
- Tomas-Barberan, F. A., & Espin, J. C. (2001). Phenolic compounds and related enzymes as determinants of quality in fruits and vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81, 853-876.
- Tomás-Barberán, F. A., & Espín, J. C. (2001). Phenolic compounds and related enzymes as determinants of quality in fruits and vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(9), 853-876.
- Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Pirbalouti, A. G., & Sadeghi, M. (2016). Dehydration behaviour, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave and hot air treatments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 407-418.

- Tous, J. & Ferguson, L. (1996): Mediterranean fruits. IN: JANICK, J. (ED.) Progress in new crops. ASHS Press, Arlington, USA. 416-430.
- Trad, M., Gaaliche, B., Renard, C. M. G. C., & Mars, M. (2013). Plant natural resources and fruit characteristics of fig (*Ficus carica* L.) change from coastal to continental areas of Tunisia. *Journal of Agricultural Research and Development*, 3(2), 022-025.
- Trad, M., Gaaliche, B., Renard, C.M.G.C., and Mars, M. (2012). Quality performance of 'Smyrna' type figs grown under Mediterranean conditions of Tunisia. *J. Ornam. and Hortic. Plants* 2, 139–146.
- Tsami, E., Maroulis, Z. B., Marinou-Kouris, D., & Saravacos, G. D. (1990). Heat of sorption of water in dried fruits. *International Journal of Food Science & Technology*, 25(3), 350-359.
- Tsanova-Savova, S., Ribarova, F., & Gerova, M. (2005). (+)-Catechin and (?)-epicatechin in Bulgarian fruits. *Journal of Food Composition and Analysis*, 18, 691–698.
- Tsantili, E., Shin, Y., Nock, J. F., & Watkins, C. B. (2010). Antioxidant concentrations during chilling injury development in peaches. *Postharvest Biology and Technology*, 57(1), 27-34.
- Tsimidou, M., Papadopoulos, G., & Boskou, D. (1992). Determination of phenolic compounds in virgin olive oil by reversed-phase HPLC with emphasis on UV detection. *Food Chem* 44(1), 53-60.
- Tunç, S., & Duman, O. (2007). Thermodynamic properties and moisture adsorption isotherms of cottonseed protein isolate and different forms of cottonseed samples, *J. Food Eng.*, 81, 133–143.
- Turkmen, N., Sari, F., & Velioglu, Y. S. (2006). Effects of extraction solvents on concentration and antioxidant activity of black and black mate tea polyphenols determined by ferrous tartrate and Folin–Ciocalteu methods. *Food chemistry*, 99(4), 835-841.
- US. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. (2016). USDA Nutrient Database for Standard Reference, Release 28, from the Nutrient Data Laboratory Home Page: <http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/search/>
- Vagenas, G. K., & Karathanos, V. T. (1993). Prediction of the effective moisture diffusivity in gelatinized food systems. *Journal of Food Engineering*, 18(2), 159-179.
- Valdeyron, G., & Lloyd, D. (1979). Sex Differences and Flowering Phenology in the Common Fig, *Ficus carica* L. *Evolution*, 33(2), 673-685.
- Valero, D., & Serrano, M. (2010). Postharvest biology and technology for preserving fruit quality.
- Vallejo, F., Marín, J. G., & Tomás-Barberán, F. A. (2012). Phenolic compound content of fresh and dried figs (*Ficus carica* L.). *Food Chemistry*, 130(3), 485-492.
- Vallese, F. (1909). *I1 fico*. F. Battiato, Catania.
- Van den Berg, C., & Bruin, S. (1981). Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In L. B. Rockland & G. F. Stewart (Eds.), *Water activity: influences on food quality* (pp. 1–61). New York: Academic Press.
- Vardin, H., Tay, A., Ozen, B., & Mauer, L. (2008). Authentication of pomegranate juice concentrate using FTIR spectroscopy and chemometrics. *Food Chemistry*, 108(2), 742-748.
- Varela-Moreiras, G., Ruiz, E., Valero, T., Ávila, J. M., & del Pozo, S. (2013). The Spanish diet: an update. *Nutrición hospitalaria*, 28(5), 13-20.

- Veberic, R., Colaric, M., & Stampar, F. (2008a). Phenolic acids and flavonoids of fig fruit (*Ficus carica* L.) in the northern Mediterranean region. *Food Chemistry*, 106(1), 153-157.
- Veberic, R., Jakopic, J., & Stampar, F. (2008b). Internal fruit quality of figs (*Ficus carica* L.) in the northern mediterranean region. *Italian Journal of Food Science*, 20(2).
- Veberic, R., Mikulic-Petkovsek, M. (2016). Phytochemical Composition of Common Fig (*Ficus carica* L.) Cultivars. *Nutr Comp Fruit Cultivars* 235-255.
- Vega-Gálvez, A., López, J., Ah-Hen, K., José Torres, M., & Lemus-Mondaca, R. (2014). Thermodynamic properties, sorption isotherms and glass transition temperature of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Food Technology and Biotechnology*, 52(1), 83-92.
- Velasco, L., Goffman, F. D., Becker, H. C. (1998). Variability for the fatty acid composition of the seed oil in a germplasm collection of the genus *Brassica*. *Genet Resour Crop Ev* 45(4), 371-382.
- Vemmos, S. N., Petri, E., & Stournaras, V. (2013). Seasonal changes in photosynthetic activity and carbohydrate content in leaves and fruit of three fig cultivars (*Ficus carica* L.). *Scientia Horticulturae* 160, 198-207.
- Venu, D. K., Munjal, S. V., Waskar, D. P., Patil, S. R. & Kale, A. A. (2005). Biochemical changes during growth and development of fig (*Ficus carica* L.) fruits. *Journal of Food Science and Technology*, 42(3), 279-282.
- Verkerke, W. (1989). Structure and function of the fig. *Experientia*, 45(7), 612-622.
- Vermaak, I., Kamatou, G. P. P., Komane-Mofokeng, B., Viljoen, A. M., & Beckett, K. (2011). African seed oils of commercial importance-Cosmetic applications. *S Afr J Bot* 77(4), 920-933.
- Vicente, A., Manganaris, G. A., Sozzi, G. O., & Crisosto, C. H. (2009). Nutritional Quality of Fruits and Vegetables. *Postharvest Handling: A Systems Approach*, (pp.58-93).
- Vidaud, J. (1997). "Le Figuier: Monographie". Edition Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes ". Paris, 263p.
- Vinha, A. F., Silva, B. M., Andrade, P. B., Seabra, R. M., Pereira, J. A., & Oliveira, M. B. (2002). Development and evaluation of an HPLC/DAD method for the analysis of phenolic compounds from olive fruits. *Journal of liquid chromatography & related technologies*, 25(1), 151-160.
- Vinson, J. A. (1999). The functional food properties of figs. *Cereal foods world*, 44(2), 82-87.
- Vinson, J. A., Zubik, L., Bose, P., Samman, N., & Proch, J. (2005). Dried fruits: excellent *in vitro* and *in vivo* antioxidants. *Journal of the American College of Nutrition*, 24(1), 44-50.
- Viuda-Martos, M., Barber, X., Pérez-Álvarez, J. A., & Fernández-López, J. (2015). Assessment of chemical, physico-chemical, techno-functional and antioxidant properties of fig (*Ficus carica* L.) powder co-products. *Industrial Crops and Products*, 69, 472-479.
- Vongsvivut, J., Heraud, P., Gupta, A., Puri, M., McNaughton, D., & Barrow, C. J. (2013). FTIR microspectroscopy for rapid screening and monitoring of polyunsaturated fatty acid production in commercially valuable marine yeasts and protists. *Analyst*, 138(20), 6016-6031.

- Vosoughkia, M., Hossainchi Ghareaghag, L., Ghavami, M., Gharachorloo, M., & Delkhosh, B. (2012). Evaluation of oil content and fatty acid composition in seeds of different genotypes of safflower. *Int J Agric Sci Res* 2(1), 59-66.
- Vosoughkia, M., Hossainchi, G. L., Ghavami, M., Gharachorloo, M., & Delkhosh, B. (2011). Evaluation of oil content and fatty acid composition in seeds of different genotypes of safflower (*Carthamus tinctorius* L.).
- Walter, H. (1924). *Zeitschrift Botanic*, 16, 393.
- Wang, D., Dai, J. W., Ju, H. Y., Xie, L., Xiao, H. W., Liu, Y. H., & Gao, Z. J. (2015). Drying kinetics of American ginseng slices in thin-layer air impingement dryer. *International journal of food engineering*, 11(5), 701-711.
- Wang, G. Y., & Singh, R. P. (1978). Single layer drying equation for rough rice. Paper-American Society of Agricultural Engineers.
- Wang, J., Mujumdar, A. S., Mu, W., Feng, J., Zhang, X., Zhang, Q., ... & Xiao, H. W. (2016). Grape Drying: Current Status and Future Trends. *Grape and Wine Biotechnology*, 145-165.
- Wang, N. & Brennan, J. G. (1991), Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures, *J Food Engng*, 14, 269–282.
- Wang, Y., Wig, T. D., Tang, J., & Hallberg, L. M. (2003). Sterilization of foodstuffs using radio frequency heating. *Journal of Food Science*, 68(2), 539-544.
- Waterhouse, A. L. (2002). Determination of total phenolics. *Current protocols in food analytical chemistry*, 6(1), 11-1.
- Watson, L., & Dallwitz, M. J. (2004). The families of flowering plants: Descriptions, illustrations, identification and information retrieval. <http://biodiversiW.uno.edu/delta> [Accessed 1 Apr. 2017].
- Wayner DDM, Burton GW, Ingold KU & Locke S (1985) Quantitative measurement of the total, peroxy radical-trapping antioxidant capability of human blood plasma by controlled peroxidation: The important contribution made by plasma proteins. *Febs Letters*, 187:33-37.
- Weiblen, G. D. (2002). How to be a fig wasp. *Annu Rev Entomol*, 47, 299-330.
- Wilson, E. E., & Ogawa, J. M. (1979). Fungal, Bacterial and Certain Nonparasitic Diseases of Fruit and Nut Crops in California. Agricultural Science Publications, Division of Agricultural Sciences, University of California, Berkeley, Publication 4090.
- Wojdyło, A., Figiel, A., Legua, P., Lech, K., Carbonell-Barrachina, Á. A., & Hernández, F. (2016). Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried jujube fruits as affected by cultivar and drying method. *Food Chemistry*, 207, 170-179.
- Wojdyło, A., Nowicka, P., Carbonell-Barrachina, Á. A., & Hernández, F. (2016). Phenolic compounds, antioxidant and antidiabetic activity of different cultivars of *Ficus carica* L. fruits. *Journal of Functional Foods*, 25, 421-432.
- Wolf, M., Walker, J. E., & Kapsalis, J. G. (1972). Water vapor sorption hysteresis in dehydrated food. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 20(5), 1073-1077.
- Wu, N., Fu, K., Fu, Y. J., *et al.* (2009). Antioxidant activities of extracts and main components of pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.] leaves. *Molecules* 14(3), 1032-1043.

- Xie, L., & Bolling, B. W. (2014). Characterisation of stilbenes in California almonds (*Prunus dulcis*) by UHPLC–MS. *Food chemistry*, 148, 300-306.
- Yahia, E. M., Carrillo-López, A., & Bello-Perez, L. A. (2019). Carbohydrates. *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*, 175–205. doi: 10.1016/b978-0-12-813278-4.00009-9
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M. J., & Oliveira, F. A. R. (2008). Sorption isotherms and moisture sorption hysteresis of intermediate moisture content banana. *Journal of Food Engineering*, 86(3), 342-348.
- Yanty, N. A. M., Lai, O. M., Osman, A., Long, K., & Ghazali, H. M. (2008). Physicochemical properties of *Cucumis melo* var. *inodorus* (honeydew melon) seed and seed oil. *Journal of Food Lipids*, 15(1), 42-55.
- Yanty, N. A. M., Lai, O. M., Osman, A., Long, K., Ghazali, H. M. (2008). Physicochemical properties of *Cucumis melo* Var. *Inodorus* (*Honeydew Melon*) seed and seed oil. *J food lipids* 15(1), 42-55.
- Ying, D., Hlaing, M. M., Lerisson, J., Pitts, K., Cheng, L., Sanguansri, L., & Augustin, M. A. (2017). Physical properties and FTIR analysis of rice-oat flour and maize-oat flour based extruded food products containing olive pomace. *Food Research International*, 100, 665-673.
- Ziyada, A. K., Elhussien, S. A. (2008). Physical and Chemical Characteristics of *Citrullus lanatus* Var. *Colocynthoide* Seed Oil.

Annexes

Annexe 1. Constantes et statistiques des modèles évalués pour la variété Kadota à $Dv=150 \text{ cm}^3/\text{h}$

Température (°C)	Constantes des modèles						Statistiques des modèles		
							R ²	χ ²	
Lewis		k							
	60	0.011198					0.9979	0.01996	
	70	1.453					0.9983	0.0183	
	80	0.020473					0.9905	0.037	
	Moyenne						0.9955	0.02508	
Page		k		n					
	60	0.011218		0.996			0.9989	0.0202	
	70	0.01221		1.0408			0.9985	0.01729	
	80	0.042593		0.81558			0.9976	0.01906	
	Moyenne						0.998333333	0.01885	
Average Wang and Singh		a		b					
	60	-		0.13756			0.9756	0.0684	
	70	-		0.000022572			0.9776	0.0673	
	80	-0.012698		0.0000389			0.9262	0.1046	
	Moyenne						0.9598	0.0801	
Logarithmic		a	k	c					
	60	0.99578	0.01034	-0.02139			0.9984	0.018	
	70	1.0279	0.014304	0.014518			0.9986	0.0167	
	80	0.89966	0.019396	0.019871			0.9967	0.0236	
	Moyenne						0.9979	0.0194	
Diffusion approximation		a	k	b					
	60	0.0053629	0.008972	0.999			0.9979	0.0201	
	70	-39.844	0.010954	1.0068			0.9985	0.0175	
	80	0.51647	0.020469	1			0.9905	0.0388	
	Moyenne						0.9956	0.0254	
Midilli-Kucuk		a	k	n	b				
	60	0.6911	0.0043096	-269.22	-0.00242			0.7212	
	70	0.68285	447.11	-279.38	-0.00306			0.7031	
	80	0.58591	370.71	-231.6	-0.00316			0.6009	
	Moyenne							0.6750	
Handerson & Pabis		a		k					
	60	0.98189		0.010939			0.9981	0.01911	
	70	1.0196		0.014883			0.9985	0.01735	
	80	0.9095		0.018164			0.9962	0.024	
	Moyenne						0.9976	0.02015	
Modified Handerson & Pabis		a	k	b	g	c	h		
	60	0.4199	0.010939	0.13473	0.010938	0.42717	0.0109	0.9981	
	70	0.43711	0.014874	0.14329	0.014876	0.43898	0.014872	0.9985	
	80	0.0035335	-0.0016525	0.13209	3.9016	0.86437	0.017339	0.9993	
	Moyenne							0.9986	
Two term		a	k ₀	b	k ₁				
	60	7.6243	0.01477	-6.6629	1.5537			0.9985	
	70	6.08736	0.017384	-5.0732	0.017975			0.9985	
	80	5.0603	0.018164	-4.1508	0.018164			0.9962	
	Moyenne							0.9977	

Annexe 2. Constantes et statistiques des modèles évalués pour la variété Kadota à $Dv=300 \text{ cm}^3/\text{h}$

Température (°C)	Constantes des modèles						Statistiques des modèles					
							R ²	χ ²				
Lewis	k											
60	0.006864						0.9972	0.0212				
	8											
70	0.010378						0.9943	0.029				
80	1.2291						0.9928	0.0313				
Moyenne							0.9947	0.0271				
Page	k		n									
60	120.61		-90.1177				0.9021	0.59				
70	0.015963		0.90477				0.9964	0.0234				
80	0.021496		0.87156				0.9969	0.0207				
Moyenne							0.9651	0.2113				
Wang and Singh	a		b									
60	-		0.00000878				0.995	0.028				
	0.005620		7									
70	-0.008291		0.00001898				0.9838	0.0497				
			2									
80	-0.01209		0.00002996				0.9828	0.0326				
			7									
Moyenne							0.9872	0.0367				
Logarithmic	a		k		c							
60	1.1045		0.005402		-0.12619		0.9986	0.0153				
70	0.97924		0.008849		-0.03842		0.9974	0.0203				
80	0.94856		0.010826		-0.01573		0.9976	0.0187				
Moyenne							0.9978	0.0181				
Diffusion approximation	a		k		b							
60	-43.15		0.0090174		0.99371		0.9974	0.0206				
70	0.5288		0.010375		1		0.9943	0.0301				
80	0.51707		0.012288		1.0004		0.9928	0.0326				
Moyenne							0.9948	0.0277				
Midilli-Kucuk	a		k		n		b					
60	0.8607		4704.5		-2938.8		-0.00286					
70	0.77702		420.83		-262.96		-0.00333					
80	0.77288		3964.9		-2477.7		-0.00400					
Moyenne							0.6790					
Handerson & Pabis	a		k									
60	0.99831		0.00684				0.9942	0.0215				
70	0.94985		0.00966				0.9971	0.021				
80	0.93658		0.01235				0.9976	0.0185				
Moyenne							0.9963	0.0203				
Modified Handerson & Pabis	a		k		b		g		c		h	
60	0.40644		0.0068371		0.17679		0.006838		0.4147		0.006837	
									5		2	
70	0.72106		0.01068		-0.49667		0.013061		0.7211		0.010631	
									7			
80	0.90082		0.009963		-0.00572		-0.01049		0.1053		0.32187	
Moyenne									0.9997		0.0064	
									0.9979		0.0174	
Two term	a		k ₀		b		k ₁					
60	10.574		0.0094069		-9.5933		0.009754					
							9					
70	0.93288		0.0094381		0.06748		0.32598					
									5			
80	0.91516		0.010887		0.08495		0.518					
Moyenne									0.9991		0.01414	
									0.9982		0.01753	

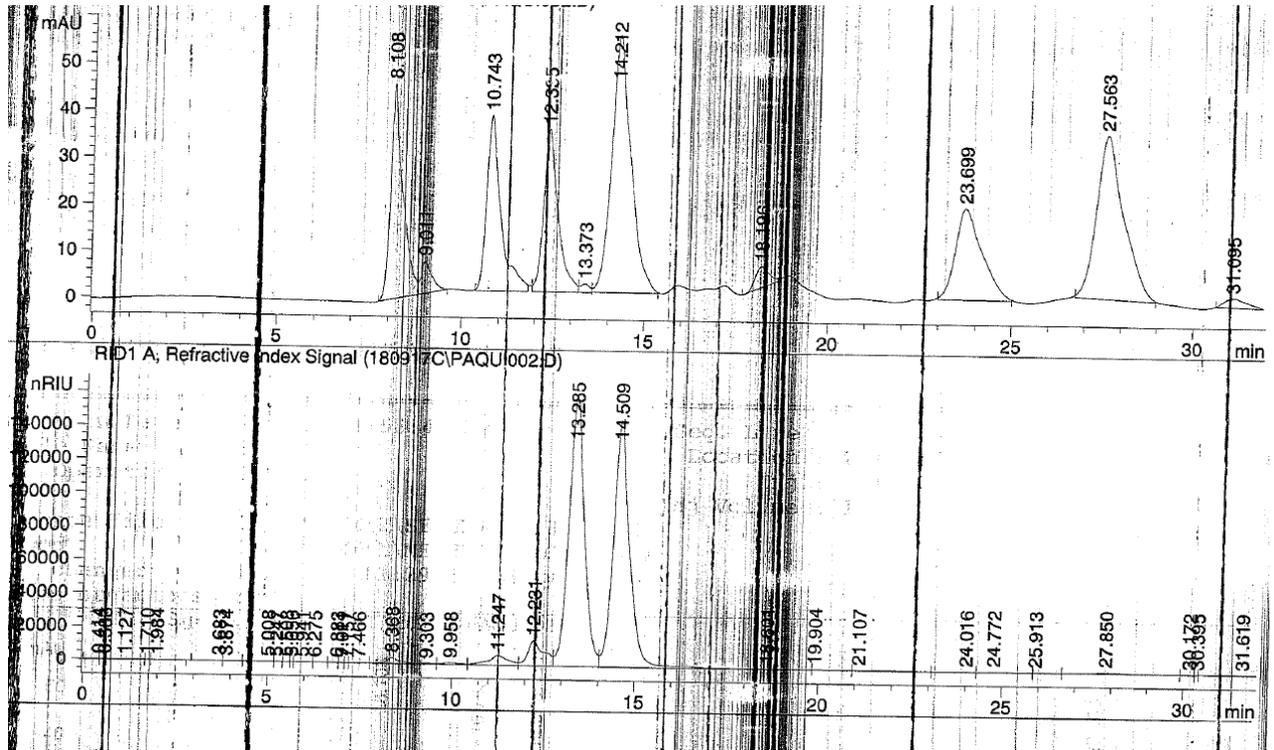
Annexe 3. Constantes et statistiques des modèles évalués pour la variété Sarilop à $D_v=150 \text{ cm}^3/\text{h}$

Température (°C)	Constantes des modèles					Statistiques des modèles	
						R ²	χ ²
Lewis	k						
60	0.0112					0.9993	0.00113
70	0.014748					0.9991	0.133
80	0.02053					0.9897	0.038
Moyenne						0.9960	0.05737
Page	k		n				
60	0.011187		1.0014			0.9993	0.0114
70	0.013991		1.01247			0.9991	0.0133
80	0.04416		0.8071			0.9976	0.01875
Moyenne						0.9986	0.01448
Wang and Singh	a		b				
60	-0.007569		0.00001382			0.9757	0.06919
70	-0.009758		0.00002288			0.9736	0.072
80	-0.0127		0.000039			0.9231	0.1059
Moyenne						0.9574	0.08236
Logarithmic	a	k	c				
60	1.0061	0.011127	-			0.9994	0.01144
			0.005667				
70	1.0138	0.01475	-			0.9992	0.013
			0.004858				
80	0.8949	0.01944	0.0214			0.9965	0.02331
Moyenne						0.9983	0.01591
Diffusion approximation	a	k	b				
60	-27.3032	0.009834	1.0048			0.9994	0.0115
70	9.8204	0.0128	0.9847			0.9991	0.0136
80	0.5164	0.02046	1			0.9897	0.0402
Moyenne						0.9960	0.02176
Midilli-Kucuk	a	k	n	b			
60	0.6958	4527.70	-2829.22	-0.00244		0.7182	0.2273
70	0.6732	4427.85	-2766.87	0.003008		0.6944	0.2353
80	0.5834	3682.44	-2300.61	-0.00314		0.5977	0.2301
Moyenne						0.6701	0.2309
Handerson & Pabis	a		k				
60	1.0026		0.011299			0.9993	0.0114
70	1.011		0.014953			0.9992	0.0129
80	0.9055		0.01811			0.996	0.02445
Moyenne						0.9981	0.01625
Modified Handerson & Pabis	a	k	b	g	c	h	
60	0.6181	0.0116	-0.23456	0.0132	0.61832	0.011647	0.9994
70	0.6561	0.014681	0.3297	0.0146	0.0296	0.0398	0.9992
80	0.007506	0.0009124	0.137	757.7092	0.8554	0.01736	0.9994
Moyenne							0.9993
Two term	a	k ₀	b	k ₁			
60	0.9923	0.011176	0.017323	0.068053		0.9994	0.0116
70	0.9859	0.0146	0.02958	0.03982		0.9992	0.0133
80	5.0582	0.0181	-4.1527	0.0181		0.9961	0.02545
Moyenne						0.9982	0.01678

Annexe 4. Constantes et statistiques des modèles évalués pour la variété Sarilop à $Dv=300$ cm^3/h

Température (°C)	Constantes des modèles						Statistiques des modèles					
							R ²	χ ²				
Lewis	k											
60	0.006823						0.9975	0.0196				
70	0.01037						0.9946	0.0283				
80	0.01228						0.9932	0.0304				
Moyenne							0.9951	0.0261				
Page	k		n									
60	0.006399		1.0132				0.9975	0.0198				
70	0.0157		0.90834				0.9966	0.0230				
80	0.02168		0.8693				0.9975	0.0181				
Moyenne							0.9972	0.0205				
Wang and Singh	a		b									
60	-		0.000008849				0.995	0.0283				
	0.0056198											
70	-0.008284		0.00001893				0.9843	0.0490				
80	-0.01023		0.00003022				0.9821	0.0501				
Moyenne							0.9871	0.0425				
Logarithmic	a		k		c							
60	1.88		0.005536		-0.1079		0.9986	0.0150				
70	0.982		0.00881		0.0409		0.9976	0.0194				
80	0.9395		0.01117		-0.002545		0.9978	0.018				
Moyenne							0.998	0.0174				
Diffusion approximation	a		k		b							
60	-0.01927		0.00449		1.0022			0.9981				
70	-0.001257		0.01037		1			0.9946				
80	0.9158		0.01089		42.3741			0.9993				
Moyenne								0.9973				
Midilli-Kucuk	a		k		n		b					
60	0.8604		4711.4048		-2943.333		-0.00285					
70	0.7777		4196.1581		-2621.755		-0.00334					
80	0.7725		3988.1606		-2492.240		-0.00399					
Moyenne							0.6767					
Handerson & Pabis	a		k									
60	0.9977		0.006801						0.9975			
70	0.9506		0.09679						0.9973			
80	0.9376		0.01124						0.9978			
Moyenne									0.9975			
Modified Handerson & Pabis	a		k		b		g		c		h	
60	0.4416		0.006801		0.1157		0.006801		0.4403		0.006801	
70	0.8574		0.01093		-0.7689		0.01293		0.8567		0.01097	
80	0.9038		0.01054		0.0004247		-0.02216		0.09691		0.3368	
Moyenne											0.9997	
Two term	a		k ₀		b		k ₁					
60	0.4869		0.006801		0.5108		0.006801					
70	0.9355		0.009471		0.06467		0.4125					
80	0.9158		0.01089		0.08433		0.4617					
Moyenne												
											0.9982	
											0.1316	

Annexe 5. HPLC-DAD chromatogramme des acides organiques. Exemple de ma variété EL Quoti Lbied



Annexe 6. HPLC-DAD chromatogramme des acides organiques. Exemple de ma variété "Snowden"

