

Évaluation du vieillissement de quatre huiles végétales utilisées en friture par la méthode d'illumination structurée (SLIPI-1p)

Serge M. Adepo^{1,2,*}, Jocelyne M. Bosson¹, Sylvere B. Dion², Kouakou Y. Adjoumani³, Kossan O. Bagui², Guy-O. Regnima^{2,4}, Thouakessah J. Zoueu²

¹Laboratoire de Physique Fondamentale Appliquée (LPFA), Université Nangui Abrogoua, Unité de Formation et de Recherche des Sciences Fondamentales Appliquées, 02 BP 808 Abidjan 02, Côte d'Ivoire.

²Laboratoire d'Instrumentation, Image et Spectroscopie (L2IS), Institut National Polytechnique Felix Houphouët-Boigny, Département de Formation et de Recherche du Génie Electrique et Electronique, Yamoussoukro BP 1093, Côte d'Ivoire

³Laboratoire de Biotechnologies, Filière Biochimie-Microbiologie de l'Unité de Formation et de Recherche en Biosciences de l'Université Félix Houphouët-Boigny, 22 BP 582 Abidjan, Côte d'Ivoire.

⁴Unité de Formation et de Recherche en Sciences et Technologie, Département de Physique, Université de Man, BP 20 Man, Cote d'Ivoire

Reçu : 30 Octobre 2024 / Reçu sous sa forme révisée : 10 Décembre 2024 / Accepté : 22 Décembre 2024

Résumé :

Le vieillissement des huiles constitue un problème important pour la sécurité sanitaire. Cette étude évalue l'effet de l'usage répété de quatre huiles utilisées en friture (huiles de palme, de tournesol, de soja et d'olive extra vierge) lors de la cuisson de morceaux de poulet, en utilisant la technique d'imagerie par illumination structurée de feuille laser (SLIPI-1p) à 450 nm. Cette méthode qui consiste à utiliser une feuille de laser modulée spatialement en intensité à partir d'un réseau de diffraction, permet une analyse précise de la dégradation par mesure des coefficients d'extinction. Quinze échantillons de chaque huile ont été analysés à une température et à une longueur d'onde spécifiques. En complément, les propriétés physico-chimiques de ces huiles ont été caractérisées conformément aux normes AOAC, permettant de corréler les propriétés optiques mesurées aux normes de qualité établies. L'huile de tournesol est restée utilisable jusqu'à la 10^{ème} friture (78 min, extinction $< 0,439 \pm 0,001 \text{ mm}^{-1}$), tandis que l'huile de soja est restée de qualité jusqu'à la 9^{ème} friture (71 min, extinction $< 0,488 \pm 0,001 \text{ mm}^{-1}$). L'huile de palme a montré une dégradation significative après la 6^{ème} friture (49 min, extinction $> 0,570 \pm 0,002 \text{ mm}^{-1}$). L'huile d'olive extra vierge a atteint des seuils de dégradation après 100 min d'utilisation, correspondant approximativement à la 13^{ème} friture (extinction $> 0,680 \pm 0,002 \text{ mm}^{-1}$). Cette étude révèle que l'huile d'olive extra vierge résiste mieux à la dégradation,

*Auteur correspondant:

Adresse e-mail : sergeadepo65@gmail.com (S.M. Adepo)

<https://doi.org/10.70974/mat08224069>

tandis que l'huile de palme est particulièrement sensible à la dégradation. Les résultats fournissent des seuils d'usage recommandés pour chaque huile et mettent en lumière l'efficacité de l'imagerie par feuille laser comme outil prometteur pour évaluer la qualité des huiles de cuisson.

Mots-clés : Vieillesse des huiles ; Friture ; Sécurité sanitaire ; SLIPI-1p ; Coefficients d'extinction.

Abstract:

The aging of oils poses a significant challenge to food safety. This study evaluates the impact of repeated use of four frying oils (palm oil, sunflower oil, soybean oil, and extra virgin olive oil) during chicken frying, using the Structured Laser Illumination Planar Imaging (SLIPI-1p) technique at 450 nm. This method, which involves spatially modulating the intensity of a laser sheet with a diffraction grating, enables precise degradation analysis by measuring extinction coefficients. Fifteen samples of each oil were analyzed at specific temperatures and wavelengths. Additionally, the physicochemical properties of these oils were characterized according to AOAC standards, allowing for the correlation of measured optical properties with established quality standards. Sunflower oil remained usable up to the 10th frying cycle (78 minutes, extinction $< 0.439 \pm 0.001 \text{ mm}^{-1}$), while soybean oil maintained quality up to the 9th frying cycle (71 minutes, extinction $< 0.488 \pm 0.001 \text{ mm}^{-1}$). Palm oil showed significant degradation after the 6th frying cycle (49 minutes, extinction $> 0.570 \pm 0.002 \text{ mm}^{-1}$). Extra virgin olive oil reached degradation thresholds after 100 minutes of use, approximately at the 13th frying cycle (extinction $> 0.680 \pm 0.002 \text{ mm}^{-1}$). This study reveals that extra virgin olive oil is the most resistant to degradation, whereas palm oil is particularly sensitive to degradation. The results provide recommended usage thresholds for each oil and highlight the effectiveness of laser sheet imaging as a promising tool for assessing the quality of cooking oils.

Keywords: Oil aging; Frying; Food safety; SLIPI-1p; Extinction coefficients.

1 Introduction

L'utilisation d'huiles dans la préparation des aliments est une pratique culinaire universelle, notamment pour la friture [1]. En Côte d'Ivoire, à l'instar des pays de l'Afrique de l'Ouest, les huiles les plus couramment utilisées en friture incluent l'huile de palme, l'huile de tournesol et, dans une moindre mesure,

l'huile de soja. Bien que l'huile d'olive, notamment l'huile d'olive extra vierge, ne soit pas couramment utilisée pour les fritures dans cette région, elle peut être employée occasionnellement pour ses propriétés nutritionnelles et son profil aromatique distinct, particulièrement dans certains contextes spécifiques [2]. Ces huiles

sont choisies non seulement pour leur disponibilité et leurs propriétés de cuisson, mais aussi pour leurs profils gustatifs distincts. Cependant, leur stabilité lors de la cuisson à haute température représente une préoccupation majeure, car elles tendent à se dégrader en formant des composés potentiellement nocifs pour la santé [3]. La stabilité thermique des huiles dépend de plusieurs facteurs, notamment leur composition en acides gras et leur degré d'insaturation. Les huiles riches en acides gras insaturés, comme celles de tournesol ou de soja, sont généralement plus sensibles à l'oxydation, ce qui peut réduire leur durabilité en conditions de friture [4]. À l'inverse, les huiles ayant un faible degré d'insaturation, au rang desquelles se trouve l'huile de palme, sont souvent considérées comme plus résistantes à l'oxydation [5]. Cependant, cette résistance peut être influencée par d'autres facteurs, comme les températures de cuisson prolongées ou les interactions avec les aliments [6]. Par ailleurs, le point de fumée, qui est un paramètre clé pour évaluer les performances des huiles en cuisson, varie également en fonction de leur composition chimique [7]. Ces éléments combinés jouent un rôle déterminant dans l'appréciation de la qualité des huiles utilisées pour la friture.

Traditionnellement, l'évaluation de la qualité des huiles repose sur des méthodes chimiques [8]. Cependant, des approches basées sur l'imagerie optique ont récemment émergé comme des outils prometteurs pour analyser les propriétés des huiles et détecter les composés de dégradation. Par exemple, Yan *et al.* [9] ont démontré l'efficacité de la microscopie confocale à balayage laser pour examiner les changements micromorphologiques dans des aliments frits, tandis que Ranasinghe *et*

al. [10] ont utilisé l'imagerie multispectrale pour évaluer la réutilisation des huiles de friture. Dans cette optique, la méthode d'imagerie par illumination structurée de feuille laser (SLIPI-1p) à une longueur d'onde de 450 nm offre des avantages significatifs pour évaluer la dégradation des huiles [11]. Cette technique se distingue par sa capacité à réduire les effets indésirables liés à la diffusion multiple de la lumière, permettant ainsi une analyse plus précise des propriétés optiques des échantillons denses [12]. En restituant des images aux contrastes améliorés et en fournissant des informations quantitatives sur les coefficients d'absorption et de diffusion, SLIPI s'avère particulièrement adaptée à l'étude des milieux complexes tels que les huiles utilisées en friture [11]. De plus, l'approche mono-photonique (1p) optimise l'efficacité de l'excitation et la collecte des données, ce qui en fait une méthode rapide et non destructive [13]. Ces caractéristiques permettent d'évaluer avec précision les changements physiques et chimiques survenant dans les huiles au cours des cycles de friture, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de leur dégradation [14]. La méthode SLIPI-1p permet également de corréler les propriétés optiques des huiles à des paramètres physico-chimiques clés déterminant la qualité et de la sécurité des huiles, tels que la teneur en composés de dégradation, l'oxydation des lipides et la formation de produits nocifs comme l'acrylamide [15-17].

L'objectif général de cette étude est d'évaluer le vieillissement ou la dégradation de quatre huiles utilisées en friture (palme, tournesol, soja et olive) lors de la cuisson de poulet de chair, en utilisant la technique SLIPI-1p. Les objectifs spécifiques incluent: (i) l'analyse comparative de la stabilité

thermique de ces huiles, en tenant compte de leur composition en acides gras ; (ii) la corrélation des propriétés optiques mesurées avec les changements physico-chimiques des huiles pendant la cuisson ; (iii) l'évaluation de l'efficacité de la méthode SLIPI-1p dans le suivi des paramètres de dégradation des huiles. En utilisant une approche innovante basée sur la diffusion de lumière structurée, cette étude vise à fournir des informations précieuses pour une meilleure compréhension de la qualité et de la sécurité des huiles de friture utilisées dans des conditions locales. Les raisons de la prise en compte de l'huile d'olive extra vierge (rarement utilisée pour la friture dans la région subsaharienne) dans cette étude, ont été exposées plus haut.

2 Matériel et méthodes expérimentales

2.1 Matériel d'étude

Le matériel étudié est constitué de quatre types d'huiles commerciales utilisées à des degrés divers en friture à Abidjan : l'huile de palme (HP), l'huile de tournesol (HT), l'huile de soja (HS) et, dans une moindre mesure, l'huile d'olive extra vierge (HO). Ces huiles ont été choisies en fonction de leur disponibilité sur le marché local et de leur usage fréquent, à l'exception de l'huile d'olive extra vierge. Des morceaux de cuisses de poulet frais, sélectionnés comme matrice alimentaire standardisée, ont été utilisés pour interagir avec les huiles lors des expériences.

2.2 Type et cadre de l'étude

Cette étude est expérimentale et s'inscrit dans une approche comparative. Les expérimentations ont été réalisées dans un laboratoire équipé pour la manipulation d'huiles alimentaires, incluant un système d'imagerie optique basé sur l'illumination structurée. Les différents types d'huiles utilisés dans cette étude ont été achetés auprès de divers vendeurs sur des marchés locaux d'Abidjan, afin d'assurer la représentativité des résultats. Ces échantillons ont ensuite été préparés selon un protocole expérimental rigoureux, spécialement conçu pour répondre aux exigences de l'étude.

2.3 Échantillonnage et collecte des échantillons d'huiles

Les huiles ont été prélevées sur le marché local selon une méthode aléatoire stratifiée, visant à couvrir divers fournisseurs et marques représentatives. Chaque type d'huile a été acheté neuf en quantités suffisantes (minimum 2 litres par type) pour permettre toutes les manipulations prévues dans l'étude. Avant chaque expérimentation, 500 mL de chaque huile ont été mesurés à l'aide d'une éprouvette graduée et versés dans des récipients séparés. Ces huiles ont ensuite été utilisées pour la friture de morceaux de poulet standardisés [2]. Des morceaux de cuisses de poulet frais, pesant chacun 50 g (± 1 g), ont été uniformisés à l'aide d'une balance électronique. Ces morceaux ont été frits de manière séquentielle dans chaque type d'huile pour 15 cycles de cuisson successifs. Les huiles ont été chauffées dans une casserole à des températures standard recommandées [1], c'est-à-dire 176 °C pour

l'huile de palme, l'huile de tournesol et l'huile de soja, puis 180 °C pour l'huile d'olive. Ces températures ont été surveillées à l'aide d'un thermomètre de cuisine précis. Chaque morceau de poulet a été frit pendant 7 minutes et 32 secondes. Après chaque cycle de friture, 25 ml d'huile ont été prélevés à l'aide d'une pipette stérile et conservés dans des flacons en verre sombre enveloppés d'aluminium pour prévenir de l'oxydation par la lumière. Chaque type d'huile a ainsi fourni 15 échantillons, totalisant 60 échantillons pour l'étude.

2.4 Acquisition et traitement des images SLIPI-1p

L'acquisition des images a été réalisée à l'aide d'un système d'imagerie par illumination structurée de feuille laser à une phase (SLIPI-1p), muni d'un réseau de modulation de fréquence de 5 lignes/mm. Ce système utilise une longueur d'onde laser de 450 nm, choisie pour ses propriétés d'interaction avec les composés optiques des huiles. En effet la méthode SLIPI-1p repose sur la capture et le traitement d'une seule sous-image modulée, permettant de distinguer la diffusion simple de la diffusion multiple grâce à une technique de détection synchrone (lock-in amplifié) [18]. Cette approche exploite l'atténuation exponentielle de la lumière diffusée une seule fois, telle que décrite par la loi de Beer-Lambert-Bouguer [19]. Les images obtenues ont été traitées pour extraire les coefficients d'extinction (μ_e) des échantillons, indicateurs de l'état de dégradation des huiles après chaque cycle de friture. Les coefficients d'extinction des 60 échantillons ont été déterminés en ajustant les signaux issus de la simple diffusion sur une distance de 15 mm. Une illustration du processus

SLIPI-1p est donnée à la figure 1. L'exemple montre le signal d'une feuille de lumière laser structurée, avec des sections efficaces extraites de deux différentes profondeurs, marquées par A et B. On observe la diminution de l'amplitude de la colonne A vers la colonne B. Les transformées de Fourier 1D des courbes A et B montrent la réduction de la force du pic du 1er ordre (fréquence de modulation). Cette fréquence est ensuite isolée en utilisant le filtrage de fréquence (zone rouge) après l'application de l'algorithme de détection synchrone. Enfin, la décroissance exponentielle est révélée, comme cela est indiqué sur l'image SLIPI et la courbe correspondante I_S . À partir d'une image modulée, l'amplitude de la modulation est extraite. La composante modulée, I_S correspond à la simple diffusion de lumière qui diminue exponentiellement avec la distance. En appliquant un ajustement exponentiel à I_S , le coefficient d'extinction μ_e , est extrait directement [19].

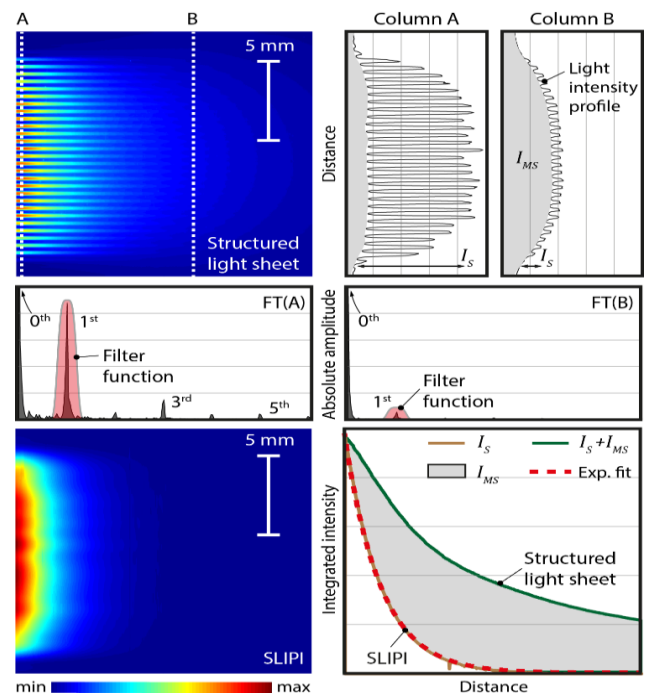


Fig. 1. Principe de la méthode de traitement SLIPI.

2.5 Détermination des caractéristiques physico-chimiques des différentes huiles

2.5.1 Indice d'acide et acidité

La détermination de l'indice d'acide et de l'acidité des échantillons d'huile s'est faite selon la méthode internationale AOAC (Association of Official Analytical Chemists) [20]. La méthode consiste à titrer par une solution de potasse alcoolique, l'acidité d'un échantillon de matière grasse initialement dissoute dans un mélange de solvants à parties égales. 2 g d'huile sont dissous dans 10 mL d'un mélange éthanol-éther diéthylique en proportions respectives 1:1 (v/v). Le mélange est ensuite titré en présence de 3 gouttes de phénolphthaléine avec une solution de potasse alcoolique 0,5 N contenue dans une burette jusqu'au virage au rose. Un essai à blanc est réalisé dans les mêmes conditions. Les essais sont effectués en triple pour chaque échantillon d'huile. L'indice d'acide est calculé à partir de l'équation (1).

$$Ia = \frac{56,1 \times N \times (V - V_0)}{m} \quad (1)$$

où Ia est l'indice d'acide en mg KOH/g d'huile, N , la normalité de la solution de potasse alcoolique, V_0 , le volume en mL de potasse alcoolique versé à l'équivalence pour l'essai à blanc, V , le volume en mL de potasse alcoolique versé à l'équivalence pour la prise d'essai et m , la masse en gramme de l'échantillon d'huile (prise d'essai). L'acidité est exprimée en pourcentage suivant l'équation (2).

$$\text{Acidité} = \frac{N \times (V - V_0) \times M}{10 \times m} \quad (2)$$

Avec *Acidité* exprimée en pourcentage (%), et M , la masse molaire en g/mol de l'acide gras considéré ($M = 282$ g/mol, pour l'acide oléique).

2.5.2 Indice de peroxyde

L'indice de peroxyde des échantillons d'huile est déterminé selon la méthode décrite par AOAC [20]. Cette méthode consiste à traiter une prise d'essai de matière grasse solubilisée dans un mélange de chloroforme et d'acide acétique, par une solution saturée d'iodure de potassium, puis à titrer l'iode libéré par une solution de thiosulfate de sodium.

1 g d'huile est dissout dans 30 mL d'un mélange chloroforme-acide acétique dans les proportions 3:2 (v/v). Au contenu précédent, est ajouté 1 mL de solution saturée d'iodure de potassium. Le flacon est ensuite bouché, agité pendant 1 min et mis à l'abri de la lumière pendant 5 min. Après ce temps de maintien à l'obscurité, 30 mL d'eau distillée sont ajoutés dans le flacon. Le mélange ainsi constitué est ensuite titré avec une solution de thiosulfate de sodium 0,01 N contenue dans une burette en présence d'empois d'amidon jusqu'à décoloration complète. Un essai à blanc est réalisé dans les mêmes conditions. Les essais sont effectués en triple pour chaque échantillon d'huile. L'indice de peroxyde est calculé à partir de l'équation (3).

$$Ip = \frac{(V - V_0) \times 10}{m} \quad (3)$$

où Ip est l'indice de peroxyde en meq O_2 /kg d'huile, V_0 , le volume en mL de thiosulfate de sodium versé à l'équivalence pour l'essai à blanc, V , le volume en mL de thiosulfate de sodium versé à l'équivalence pour la prise d'essai et m , la masse en gramme de l'échantillon d'huile (prise d'essai).

2.6 Analyse statistique

Les analyses d'échantillons ont été réalisées en triple et les moyennes des résultats sont considérées. Pour les différents tests statistiques, l'ANOVA à un facteur avec un seuil de significativité de 5% sera utilisée. Toutefois, si la distribution des données ne suit pas une loi normale, des tests non paramétriques [21] seront utilisés pour la comparaison des différents groupes. Dans ce cas, le test de Friedman [22], à un facteur (K échantillons), sera utilisé pour la réalisation des groupes homogènes avec le logiciel IBM SPSS STATISTICS 20 [23].

3 Résultats et Discussion

3.1 Évolution des caractéristiques de l'huile de palme en fonction du temps de chauffage

La figure 2 illustre les changements des coefficients d'extinction, des indices d'acide et de peroxyde de l'huile de palme au fil du temps. Les coefficients d'extinction augmentent de 0,2193 à 0,9177 mm^{-1} , tandis que l'indice d'acide passe de 1,246 à 1,308 mg de KOH/g. L'indice de peroxyde atteint un maximum de 12,941 méq O_2/kg à 63,56 minutes avant de diminuer. Cette tendance indique une dégradation rapide de l'huile de palme sous l'effet de la chaleur. Cela pourrait se justifier par une exposition prolongée à une température légèrement plus élevée que celle idéale pour l'huile de palme [5]. En effet, des températures élevées favorisent l'oxydation thermique et l'hydrolyse, qui sont des mécanismes connus pour détériorer les propriétés

physico-chimiques des huiles [6]. Par ailleurs, les interactions complexes entre les huiles et les aliments frits, notamment la migration de composés lipophiles et hydrophiles, peuvent accélérer la formation de produits de dégradation, soulignant la complexité des mécanismes en conditions réelles de friture [24]. L'augmentation initiale de l'indice de peroxyde témoigne d'une phase de formation active des peroxydes, tandis que la baisse subséquente résulte probablement de leur décomposition en composés secondaires [25, 26]. Ces observations confirment que l'huile de palme est particulièrement sensible à la dégradation thermique et oxydative.

3.2 Évolution des caractéristiques des huiles de tournesol et de soja

Les figures 3 et 4 montrent une augmentation similaire des coefficients d'extinction, des indices d'acide et de peroxyde pour les huiles de tournesol et de soja. Les indices de peroxyde culminent respectivement à 13,752 méq O_2/kg à 100,16 minutes (tournesol) et 13,958 méq O_2/kg à 85,32 minutes (soja), avant de décroître.

Ces résultats traduisent une résistance modérée des huiles de tournesol et de soja à la dégradation. L'accumulation de peroxydes et leur dégradation ultérieure indiquent que ces huiles peuvent être utilisées plus longtemps que l'huile de palme, mais leur qualité se détériore néanmoins au-delà de la 10^{ème} friture.

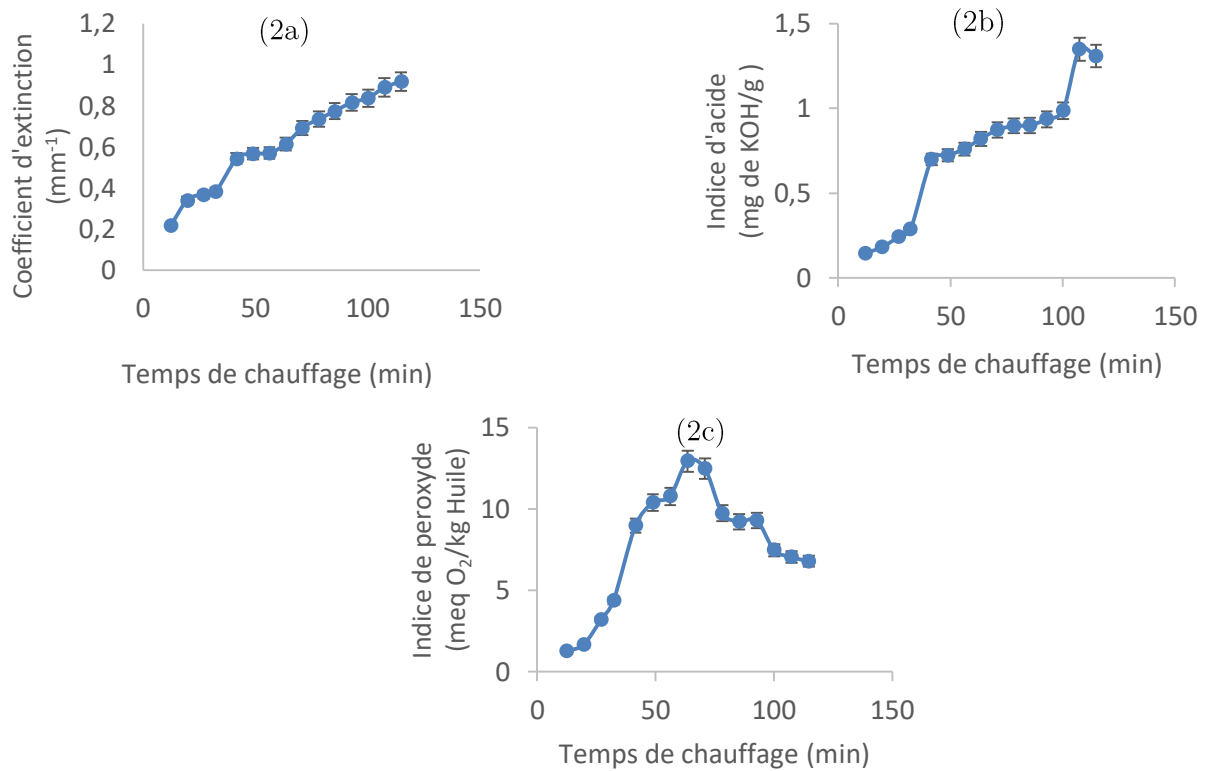


Fig. 2. Évolution du coefficient d'extinction à 450 nm des indices d'acide et de peroxyde de l'huile de palme en fonction du temps de chauffage. (2a) : Coefficient d'extinction ; (2b) : Indice d'acidité ; (2c) : Indice de peroxyde.

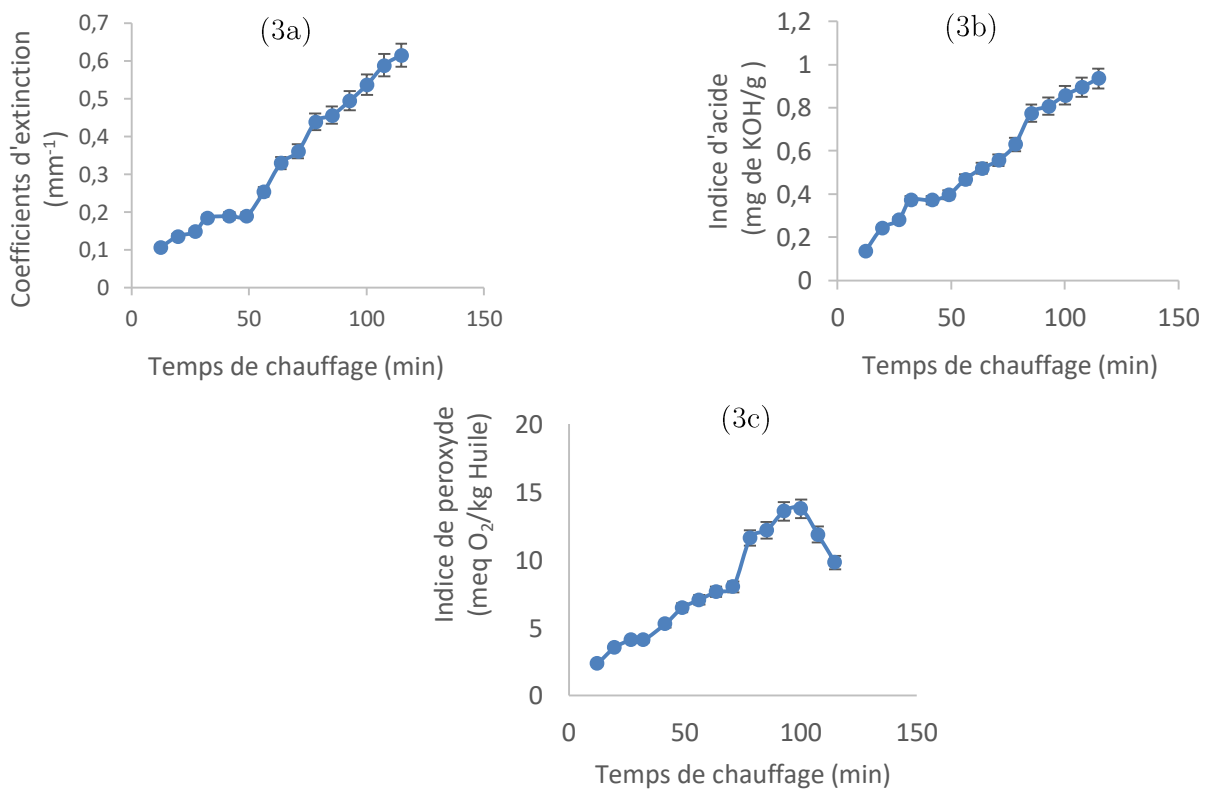


Fig. 3. Évolution du coefficient d'extinction à 450 nm, des indices d'acide et de peroxyde de l'huile de tournesol en fonction du temps de chauffage. (3a) : Coefficient d'extinction ; (3b) : Indice d'acidité ; (3c) : Indice de peroxyde.

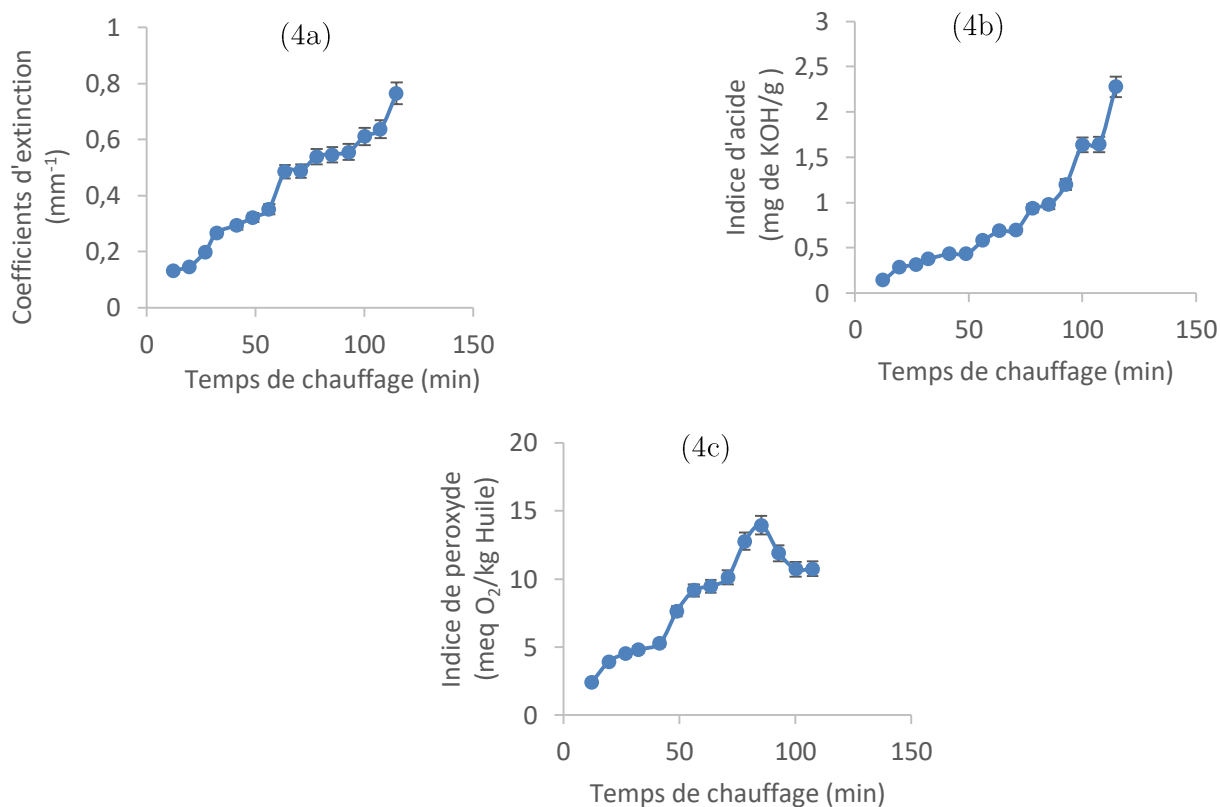


Fig. 4. Évolution du coefficient d'extinction à 450 nm, des indices d'acide et de peroxyde de l'huile de soja en fonction du temps de chauffage. (4a) : Coefficient d'extinction ; (4b) : Indice d'acidité ; (4c) : Indice de peroxyde.

3.3 Évolution des caractéristiques de l'huile d'olive extra vierge

La figure 5 montre une augmentation progressive et régulière des coefficients d'extinction, de l'acidité (de 0,123% à 1,173%) et de l'indice de peroxyde (de 0,096 à 23,149 meq O₂/kg) pour l'huile d'olive extra vierge, jusqu'à la 15^{ème} friture.

Contrairement aux autres huiles, l'huile d'olive montre une meilleure stabilité thermique et oxydative. Son profil d'évolution traduit une capacité à résister aux effets de la chaleur et de l'oxydation pendant une durée plus longue. Cependant, elle devient impropre à la consommation après 100 minutes ou 13 fritures, lorsque les seuils de qualité (acidité et indice de peroxyde) sont dépassés.

3.4 Comparaison globale des coefficients d'extinction

La figure 6 met en évidence les différences dans les coefficients d'extinction pour les quatre huiles en fonction du temps de chauffage. L'huile de palme montre les valeurs les plus élevées et une augmentation rapide, tandis que l'huile d'olive extra vierge présente une évolution plus stable. Ces différences reflètent la composition chimique et la résistance intrinsèque des huiles. L'huile de palme, riche en acides gras saturés, se dégrade plus rapidement, tandis que l'huile d'olive, riche en antioxydants naturels, offre une meilleure résistance. Les huiles de tournesol et de soja occupent une position intermédiaire, avec une qualité qui se détériore après un temps d'utilisation prolongé.

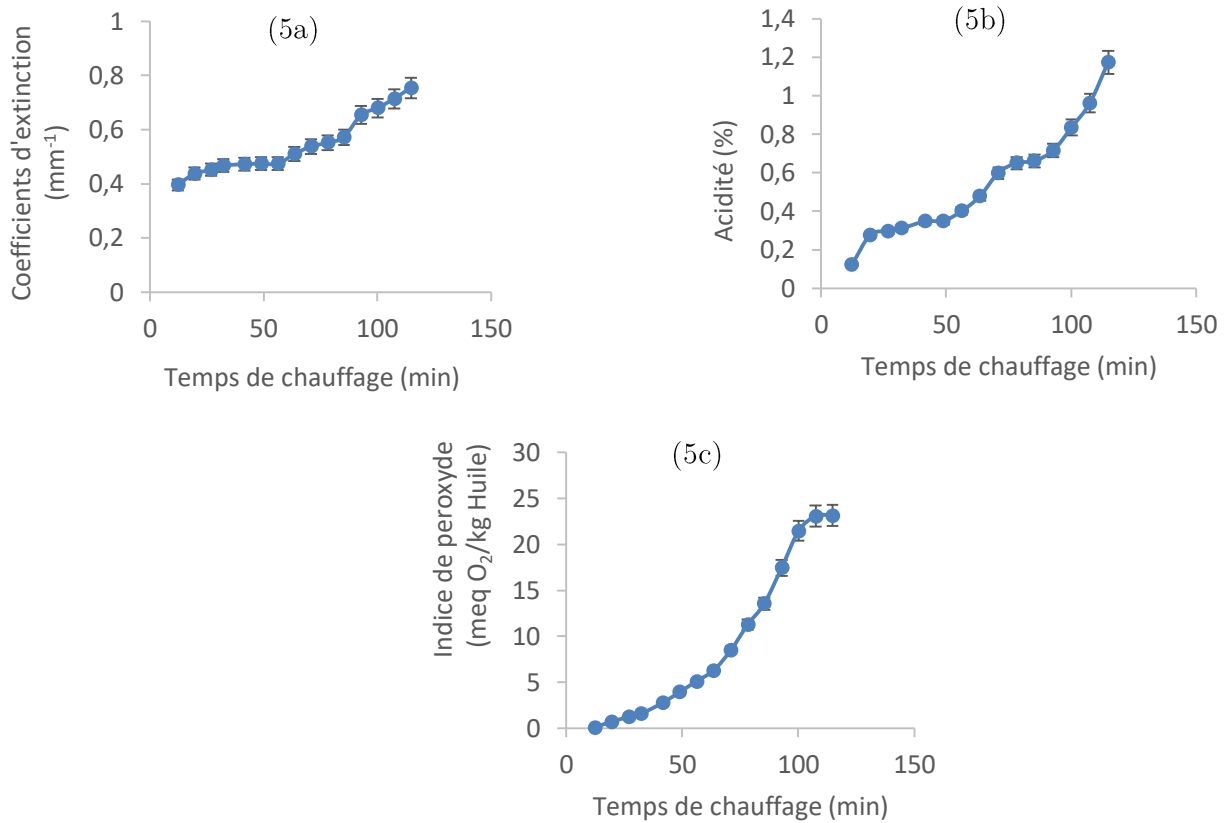


Fig. 5. Évolution du coefficient d’extinction à 450 nm de l’acidité et de l’indice de peroxyde de l’huile d’olive extra vierge en fonction du temps de chauffage. (5a) : Coefficient d’extinction ; (5b) : Acidité ; (5c) : Indice de peroxyde.

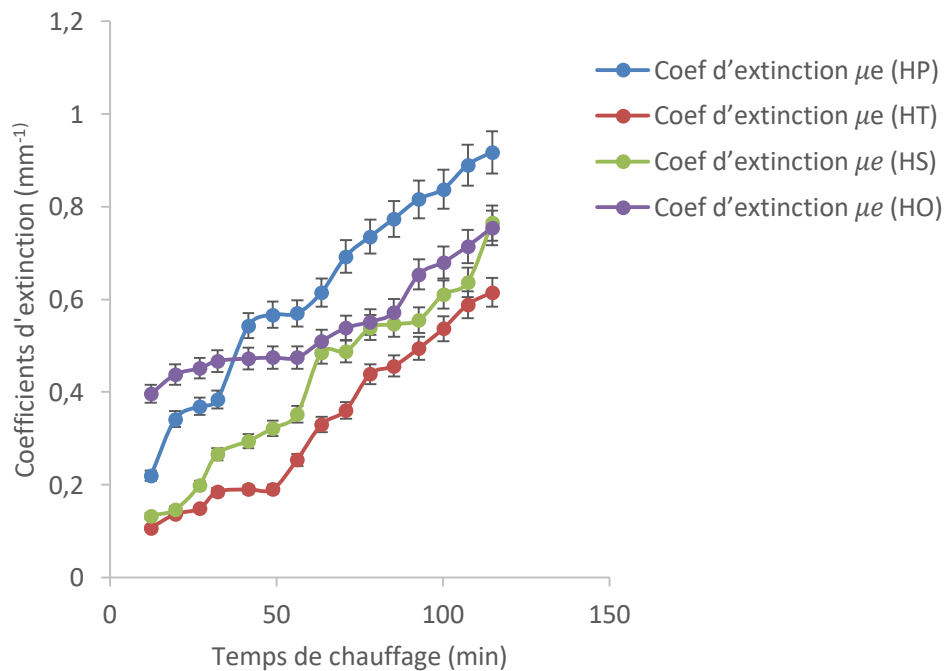


Fig. 6. Évolution du coefficient d’extinction à 450 nm des quatre huiles étudiées en fonction du temps de chauffage.

3.5 Estimation des limites critiques des coefficients d'extinction pour des huiles usagées

Selon les normes du *Codex Alimentarius* [27, 28], la qualité des huiles utilisées en friture est définie par des valeurs critiques d'acidité et de peroxyde. Une huile de palme, de tournesol ou de soja est considérée de bonne qualité si son indice d'acide est inférieur à 0,6 mg de KOH/g et son indice de peroxyde inférieur à 10 méq O₂/kg. De même, pour une huile d'olive extra vierge, elle est jugée de bonne qualité si son acidité exprimée en pourcentage est inférieure à 0,8% et son indice de peroxyde inférieur à 20 méq O₂/kg.

Pour cette étude, ces normes ont servi de référence pour corréliser les seuils d'acidité et de peroxyde aux propriétés optiques, mesurées pour la première fois à 450 nm à l'aide de la technique SLIPI-1p. Afin de renforcer cette corrélation, les propriétés physico-chimiques des huiles ont été caractérisées expérimentalement suivant les protocoles AOAC, permettant de mieux établir le lien entre la qualité chimique et les coefficients d'extinction mesurés optiquement. Ces normes indiquent qu'il est recommandé de remplacer chaque type d'huile après un certain nombre de cycles de friture, afin de garantir une qualité optimale et de prévenir les risques liés à la dégradation. Ainsi, en se basant sur ces seuils, le tableau 1 présente une estimation des seuils de coefficients d'extinction pour différents types d'huiles obtenus à partir de la technique SLIPI-1p, en fonction du nombre de cycles après lesquels ces seuils sont dépassés. Les résultats montrent que les seuils critiques des coefficients d'extinction, en corrélation avec les propriétés physico-chimiques, permettent d'évaluer

avec précision la qualité des huiles après plusieurs cycles de friture. Cette méthode représente une avancée significative en combinant analyse chimique et imagerie optique pour définir des limites pratiques d'usage des huiles de friture.

3.6 Analyse comparative des résultats

Les résultats obtenus indiquent des seuils distincts de dégradation pour chaque type d'huile étudiée, exprimés en fonction du coefficient d'extinction (μe) mesuré à 450 nm. Ces seuils permettent de déterminer la durée et le nombre de cycles de friture avant que la qualité de chaque huile ne devienne inadéquate pour la consommation. En outre, les résultats montrent que l'huile de palme dépasse ses seuils de qualité après seulement 6 cycles de friture (environ 49 minutes), correspondant à un coefficient d'extinction de $0,570 \pm 0,002 \text{ mm}^{-1}$. Cette dégradation rapide est en accord avec la littérature, qui attribue une stabilité modérée à l'huile de palme, bien qu'elle contienne une proportion importante d'acides gras saturés. Cela peut être expliqué par la formation de composés polaires et de produits d'oxydation primaire à des températures élevées, comme le rapportent Gertz [29] et, Paul et Mittal [30]. Avec un seuil de dégradation atteint après 10 cycles (78 minutes) et un coefficient d'extinction de $0,439 \pm 0,001 \text{ mm}^{-1}$, l'huile de tournesol se classe comme moins stable que l'huile d'olive extra vierge, mais plus résistante que l'huile de palme. Selon Farhoosh *et al.* [31], les huiles riches en acides gras insaturés, telles que l'huile de tournesol, subissent une oxydation accrue à haute température, ce qui correspond à nos observations.

Tableau 1

Seuils de coefficients d'extinction pour les quatre huiles utilisées en friture.

Type d'huile	Nombre de cycles avant dépassement des seuils de qualité	Durée approximative (min)	Coefficient d'extinction (mm^{-1})	Observations
Huile de palme	6	49	$0,570 \pm 0,002$	Seuils de qualité dépassés après $0,56993 \text{ mm}^{-1}$, nécessite un remplacement immédiat
Huile de tournesol	10	78	$0,439 \pm 0,001$	Seuils de qualité dépassés après $0,43880 \text{ mm}^{-1}$, indique une dégradation, remplacement conseillé pour maintenir la qualité.
Huile de soja	9	71	$0,488 \pm 0,001$	Dégradation notable après $0,4880 \text{ mm}^{-1}$, nécessite un remplacement
Huile d'olive extra vierge	13	100	$0,680 \pm 0,002$	L'acidité dépasse les limites à $0,6798 \text{ mm}^{-1}$, nécessite un remplacement

L'huile de soja atteint son seuil critique après 9 cycles de friture (71 minutes) à un coefficient d'extinction de $0,488 \pm 0,001 \text{ mm}^{-1}$. La littérature, notamment Choe et Min [32], note que cette huile, bien que riche en acides gras insaturés, possède des composés antioxydants naturels qui retardent partiellement son oxydation. Cependant, ces composés sont progressivement détruits par la chaleur, entraînant une dégradation rapide.

L'huile d'olive extra vierge présente une stabilité remarquable, avec des seuils

atteints après 13 cycles (100 minutes) et un coefficient d'extinction de $0,680 \pm 0,002 \text{ mm}^{-1}$. Ces résultats confirment son excellente résistance à l'oxydation, principalement attribuable à sa teneur élevée en antioxydants phénoliques et à une proportion modérée d'acides gras insaturés. Selon Boskou [2], les huiles d'olive vierges contiennent des composés bioactifs qui retardent significativement leur dégradation, en ligne avec nos observations. Ainsi, les résultats de cette étude mettent en évidence une relation entre le nombre de

cycles de friture et le coefficient d'extinction. Les huiles les plus stables, comme l'huile d'olive extra vierge, conservent leurs propriétés qualitatives plus longtemps, contrairement à l'huile de palme, qui se dégrade rapidement. Ces tendances s'accordent avec la littérature, soulignant l'importance des profils en acides gras et des composés antioxydants dans la stabilité des huiles utilisées en friture.

L'analyse statistique réalisée à l'aide du test de Friedman a permis de montrer des différences significatives entre les coefficients d'extinction mesurés pour chaque type d'huile aux différents cycles de friture ($p < 0,05$). Chaque huile forme un sous-ensemble homogène distinct, caractérisé par son profil en acides gras et sa teneur en composés antioxydants. Le test de Friedman montre ainsi que les huiles étudiées ne sont pas comparables en termes de stabilité. Ces résultats renforcent les conclusions qualitatives initiales, mettant en évidence la relation entre le nombre de cycles de friture, les coefficients d'extinction et la stabilité des huiles.

3.7 Recommandations sur la qualité des huiles en fonction des seuils de qualité

Les résultats mettent en évidence que le vieillissement des huiles utilisées en friture entraîne des changements significatifs dans leurs propriétés optiques et physico-chimiques, ce qui nécessite une surveillance stricte des critères de qualité. En particulier, les seuils critiques définis par les coefficients d'extinction pour chaque huile doivent être utilisés comme repères pour évaluer leur réutilisabilité lors de chauffages répétés. Ces observations soulignent l'importance d'une évaluation

continue pour détecter les moments où les huiles deviennent inadéquates à la consommation, optimisant ainsi la gestion de la qualité et la sécurité alimentaire. Par conséquent, ces résultats renforcent la nécessité de pratiques rigoureuses de remplacement régulier des huiles afin de prévenir les risques liés à la consommation d'huiles dégradées.

4 Conclusion

Dans cette étude, nous avons évalué la durabilité et la dégradation de quatre huiles utilisées en friture (palme, tournesol, soja et olive extra vierge) lors de la cuisson de morceaux de poulet de chair. Grâce à la technique SLIPI-1p, des données précises sur les changements physiques des huiles ont permis d'établir des seuils critiques de qualité.

Nos résultats montrent que l'huile de tournesol reste utilisable jusqu'à un coefficient d'extinction moyen de $0,439 \pm 0,001 \text{ mm}^{-1}$ (78 minutes, 10 fritures), tandis que l'huile de soja atteint sa limite à $0,488 \pm 0,001 \text{ mm}^{-1}$ (71 minutes, 9 fritures). L'huile de palme se dégrade rapidement après 49 minutes (6 fritures) à un coefficient de $0,570 \pm 0,002 \text{ mm}^{-1}$, alors que l'huile d'olive extra vierge, plus stable, reste appropriée jusqu'à 100 minutes (13 fritures) avec un coefficient de $0,680 \pm 0,002 \text{ mm}^{-1}$. Ces observations soulignent une corrélation entre la durée d'utilisation des huiles et leur coefficient d'extinction à 450 nm, indicateur de leur dégradation.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de surveiller la qualité des huiles utilisées en friture pour prévenir la formation de composés nocifs et protéger la santé. Les techniques avancées comme

SLIPI-1p offrent un outil prometteur pour détecter la dégradation des huiles et garantir la sécurité alimentaire. Cette étude ouvre des perspectives intéressantes pour l'industrie alimentaire, notamment le développement de techniques de contrôle qualité plus efficaces et la conception d'équipements adaptés à des applications industrielles spécifiques.

Références bibliographiques

- [1] E. Choe, D. B. Min, *Chemistry of deep-fat frying oils*, Journal of Food Science, 72(5) (2007) 77-86.
<https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00352.x>
- [2] D. Boskou, I. Elmadfa, *Frying of food: Oxidation of lipids*, European Journal of Lipid Science and Technology 108(8) (2006) 715-719.
<https://doi.org/10.1002/ejlt.200600169>
- [3] R.F. Stier, *Frying oils: Quality control of frying oils*, European Journal of Lipid Science and Technology 115(9) (2013) 1139-1143.
<https://doi.org/10.1002/ejlt.201300172>
- [4] F. Shahidi, Y. Zhong, *Lipid oxidation and improving the oxidative stability*, Chemical Society Reviews 39(11) (2010) 4067-4079.
<https://doi.org/10.1039/b922183m>
- [5] E. Choe, D.B. Min, *Mechanisms and factors for edible oil oxidation*, Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 5(4) (2006) 169-186.
- [6] M.K. Gupta, Practical guide to vegetable oil processing, AOCS Press (2005).
- [7] R.S. Kirk, R. Sawyer, Pearson's Composition and Analysis of Foods (9th Edition), Longman Scientific & Technical (1991).
- [8] D. Firestone, Official Methods and Recommended Practices of the AOCS (6^e ed.), American Oil Chemists' Society (2009).
- [9] D. Yang, L. Zhu, G. Wu, X. Li, P. Li, H. Zhang, T. Liu, *Whether the degradation of frying oil affects oil absorption: Tracking fresh and degraded oil in fried potato strips during frying and cooling and micro-structure characterization*, Food and Bio-products Processing 133 (2022) 87-99.
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2022.03.001>
- [10] D.Y.L. Ranasinghe, H.K. Weerasooriya, S. Herath, M.P.B. Ekanayake, H.M.V.R. Herath, G.M.R.I. Godaliyadda, T. Madhujith, *Transmittance Multispectral Imaging for Reheated Coconut Oil Differentiation*, IEEE Access 10 (2022) 12530-12547.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3144841>
- [11] E. Berrocal, E. Kristensson, J. Zetterberg, M. Aldén, *SLIPI: A versatile technique for gas and liquid phase imaging*, Optics Letters 35(8) (2016) 1350-1352.
<https://doi.org/10.1364/OL.35.001350>
- [12] E. Kristensson, Structured Laser Illumination Planar Imaging: SLIPI Applications for Spray Diagnostics, Doctoral Thesis, Lund University (2012).
<https://portal.research.lu.se/en/publications/structured-laser-illumination-planar-imaging-slipi-applications-f>

- [13] P.W. Atkins, M. Monnet, J. De Paula, *Chimie Physique*, 2nd edition, De Boeck (2004).
- [14] A.C. Eckbreth, *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, 3rd edition, Taylor and Francis (1996).
- [15] J.E. Dec, A Conceptual Model of DI Diesel Combustion Based on Laser-Sheet Imaging*, SAE Technical Paper 970873 (1997).
<https://doi.org/10.4271/970873>
- [16] T. Koffi, K.S. Kassi, G. Kone, J.S. N'Cho, M. Edoé, J. Bosson, I. Fofana, J. Zoueu, *Using structured laser illumination planar imaging (SLIPI) as a new technique to monitor the degradation of biodegradable oils in electrical power transformers*, IET Generation, Transmission & Distribution 16(13) (2022) 2642-2653.
<https://doi.org/10.1049/gtd2.12480>
- [17] G.-O. Regnima, A. Betié, T. Koffi, O. K. Bagui, I. Fofana, A. Kouacou, J. Zoueu, *Monitoring power transformers oils deterioration using structured laser illumination planar imaging*, Measurement 113 (2018) 38-45.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.019>
- [18] M.L. Meade, *Advances in lock-in amplifiers*, Journal of Physics E: Scientific Instruments 15(4) (1982) 395-403.
<https://doi.org/10.1088/0022-3735/15/4/001>
- [19] G.-O. Regnima, T. Koffi, O. Bagui, A. Kouacou, E. Kristensson, J. Zoueu, E. Berrocal, *Quantitative measurements of turbid liquids via structured laser illumination planar imaging where absorption spectrophotometry fails*, Applied Optics 56(13) (2017) 3929.
<https://doi.org/10.1364/AO.56.003929>
- [20] H.N. Al-Mentafji, AOAC, Official Methods of Analysis of AOAC International, 18e Ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington DC (2005) Methods 935.14 et 992.24.
- [21] W.J. Conover, *Practical Nonparametric Statistics*, 3e ed., Wiley (1998).
- [22] M. Friedman, *The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance*, Journal of the American Statistical Association 32 (1937) 675-701.
<https://doi.org/10.1080/01621459.1937.10503522>
- [23] J. Pallant, *SPSS Survival Manual: A Step by Step Guide to Data Analysis Using IBM SPSS*, 7e ed., Routledge (2020).
- [24] J. Velasco, M.L. Andersen, L.H. Skibsted, *Evaluation of oxidative stability of vegetable oils by monitoring the formation of volatiles by static headspace gas chromatography*, European Journal of Lipid Science and Technology 106(7) (2004) 485-492.
<https://doi.org/10.1002/ejlt.200400952>
- [25] N. Mahmud, J. Islam, W. Oyom, K. Adrah, S.C. Adegoke, R. Tahergorabi, *A review of different frying oils and oleogels as alternative frying media for fat-uptake reduction in deep-fat fried foods*, Heliyon 9(11) (2023) e21500.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21500>
- [26] A.E. Ujong, N.J.T. Emelike, F. Owuno, P. N. Okiyi, *Effect of frying cycles on the physical, chemical and antioxidant properties of selected plant oils during*

- deep-fat frying of potato chips*, Food Chemistry Advances 3 (2023) 100338.
<https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100338>
- [27] C. Heggum, *Codex Alimentarius*. In “Encyclopedia of Dairy Sciences”, Elsevier (2022) 726-736.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-8187661.00241-5>
- [28] M. Varadi, The international regulation of chemical toxicants in food. *Codex Alimentarius*, In “Food Toxicants Analysis” Elsevier (2007) 1-10.
<https://doi.org/10.1016/B978-044452843-8/50002-X>
- [29] C. Gertz, *Chemical and physical parameters as quality indicators of used frying fats*, European Journal of Lipid Science and Technology 102(8-9) (2000) 566–572.
[https://doi.org/10.1002/1438-9312\(200009\)102:8/9<566::AID-EJLT566>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/1438-9312(200009)102:8/9<566::AID-EJLT566>3.0.CO;2-B)
- [30] S. Paul, G.S. Mittal, *Regulating the use of degraded oil/fat in deep-fat/oil food frying*, Critical Reviews in Food Science and Nutrition 37(7) (1997) 635–662.
<https://doi.org/10.1080/10408399709527797>
- [31] R. Farhoosh, S. Einafshar, P. Sharayei, *The effect of commercial refining steps on the rancidity measures of soybean and canola oils*, Food Chemistry 109(4) (2008) 1101–1105.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.01.025>
- [32] E. Choe, D.B. Min, *Chemistry of deep-fat frying oils*, Journal of Food Science, 72(5) (2007) R77–R86.
<https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00352.x>