UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Etude d’altération des huiles utilisées dans la fabrication des beignets commercialisés dans la ville de Bujumbura

Nshimirimana, Cyriaque; Sous l’encadrement de: Pr. Dr. Ir. Niyukuri Jonathan

2026-06
UB, EANSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2446

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI

EAST AFRICAN NUTRITIONAL SCIENCES INSTITUTE (EANSI)

MASTER EN SCIENCES DES ALIMENTS ET NUTRITION

Option : Sécurité alimentaire et changement climatique

ETUDE D'ALTERATION DES HUILES UTILISEES DANS LA FABRICATION DES BEIGNETS COMMERCIALISES DANS LA VILLE DE BUJUMBURA

Par:

NSHIMIRIMANA Cyriaque

Mémoire présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention d'un diplôme de Master en sciences des aliments et nutrition

Option : Sécurité alimentaire et changement climatique

Sous l'encadrement de:

Pr. Dr. Ir. NIYUKURI Jonathan

Bujumbura, Juin 2026

MEMBRES DU JURY

Président: Dr.Ir. Bonaventure NIYOYANKANA

Secrétaire: Msc.Ir. Robert MUVUNYI

Membre: Pr. Dr. Ir. Jonathan NIYUKURI

DEDICACES

A

DIEU, le tout puissant et miséricordieux,

Mon épouse KANYAMUNEZA Alice,

Mon cher regretté père BIGIRIMANA Joseph,

Ma chère mère KIGEME Bernadette,

Mon cher oncle paternel NDIKUMANA Patrice,

Ma petite sœur NIYIBITANGA Jeannette,

La famille NISUBIRE Gilbert,

Tous ceux qui me sont chers,

Je dédie

Ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Nous disons d'abord infiniment merci à Dieu, notre créateur et sauveur car sans Lui, nous n'aurions pas eu la bonne santé, le courage, la patience et l'engouement de mener à bon port ce travail. Nous tenons à remercier sincèrement la Banque Africaine de Développement(BAD) pour avoir financé entièrement le Projet d'Appui au Centre d'Excellence Régional en Sciences de la Nutrition – East African Nutritional Sciences Institute (PA- EANSI). Aux enseignants du Centre d'Excellence Régional en Sciences de la Nutrition, nous disons merci pour votre formation pluridisciplinaire car sans Celle-ci, il nous serait pratiquement difficile de réaliser un tel travail.

Nous tenons aussi à exprimer nos meilleurs remerciements et notre profonde gratitude à notre promoteur et directeur de ce mémoire, Pr. Dr. Ir. NIYUKURI Jonathan, qui, malgré ses multiples préoccupations, s'est investi dans la réalisation de ce travail et m´a appris le sens de la recherche. Je n'oublierai jamais ses conseils judicieux, ses remarques pertinentes, sa compétence, son amour de travail, sa rigueur scientifique et son dévouement car ils m´ont été bénéfiques et guideront toujours mes pas tant le plan scientifique que professionnel.

Ma profonde reconnaissance revient également à ma tendre mère KIGEME Bernadette, qui, malgré le départ anticipé de mon cher Père BIGIRIMANA Joseph, est restée forte, s´est donnée corps et âme pour assurer ma survie et n'a cessé de m'apprendre à distinguer le bon grain de l'ivraie.

Mes plus profonds sentiments de reconnaissance et remerciement s'adressent également à mon cher oncle paternel NDIKUMANA Patrice pour avoir joué le rôle de mon père depuis ma toute petite enfance et pensé à me mettre sur le banc de l'école. N'eut été son courage, ses conseils et surtout son suivi rigoureux, je ne serais pas parvenu à ce stade.

Merci beaucoup aussi à ma femme, il n'a pas été toujours facile de se réveiller très tôt comme si vous avez un rendez-vous, vous avez vraiment fait les vôtres mes préoccupations académiques. Que tu trouves en moi les plus profonds sentiments de gratitude et de reconnaissance pour tous les services rendus lorsque je me préparais dans la matinée pour aller faire mes recherches ou lorsque je rentrais parfois très épuisé. Aux camarades de classe du Master en Sciences des Aliments et Nutrition et en particulier ceux de la Sécurité Alimentaire et Changement Climatique, merci pour votre solidarité et collaboration. Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à tous ceux qui ont contribué d'une façon ou d'une autre, de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Que Dieu soit loué

NSHIMIRIMANA Cyriaque

RESUME

Au Burundi, les études qui portent sur le contrôle de la qualité des denrées alimentaires en particulier les produits frits comme les beignets sont rares. À Bujumbura et ses environs, les beignets sont très consommés. Cependant, les huiles utilisées sont généralement instables et subissent diverses formes d'altérations pendant le stockage et la friture (l'hydrolyse, l'oxydation et la polymérisation) qui modifient leurs caractéristiques physicochimiques et organoleptiques. Cette étude avait pour objectif d'évaluer la qualité des huiles utilisées pendant la friture des beignets commercialisés dans la ville de Bujumbura par la détermination de l'indice de peroxyde, l'indice d'acide et du profil lipidique. 30 échantillons par commune soit 90 échantillons au total ont été collectés.

L'indice de peroxyde, l'indice d'acide et le profil lipidique ont été déterminés respectivement par la méthode standard ISO3960 :2017/A1 :2020, ISO 660 :2020 et ISO12966-2:2017 pour la préparation des esters méthyliques d'acides gras (FAME) suivi de ISO 12966-4:2026 pour l'analyse des FAME par chromatographie en phase gazeuse (GC-FID). L'analyse statistique a été réalisée grâce au logiciel SPSS. Il a été trouvé un indice de peroxyde moyen de 36.33±24.60 méq O2/Kg, 36.83±25.95 méq O2/Kg et de 37.01±24.93 méq O2/Kg respectivement dans la commune Ntahangwa,Mukaza et Mugere, tous statistiquement égaaux ((P>0.05) . Selon les résultats de cette étude, les produits frits en particulier les beignets fabriqués artisanalement et vendus dans la ville de Bujumbura sont globalement hyperperoxydés (IP= 36.47±24.40 méq O2/Kg.) et sont hors normes (IP> 10 méq O2/Kg). Des valeurs d'indice d'acide moyen de 5.50±2.49 mg KOH/g, 5.59±2.71 mg KOH/g et de 5.74±2.63 mg KOH/g ont été obtenues respectivement dans les communes Ntahangwa, Mukaza et Mugere, toutes statistiquement équivalentes (P>0.05) correspondant à une acidité globale de 5.54±2.57 mg KOH/g dans la ville de Bujumbura. D'après les résultats de cette étude, il est à constater que les huiles utilisées dans la friture des beignets fabriqués informellement et vendus sont généralement trop acides et sont en dehors des normes car leur acidité dépassait de loin 0.6 KOH/g (valeur maximale acceptable selon les normes). En fin, l'analyse comparative des chromatogrammes d'acides gras de l'échantillon témoin et les échantillons d'huiles ayant été utilisées dans la friture des beignets montre que les huiles utilisées dans la friture des beignets avaient perdu qualitativement et quantitativement les acides gras dont les consommateurs ont besoin et leur consommation expose les consommateurs aux effets indésirables. En effet, la décomposition des acides gras, en donnant des produits potentiellement toxiques notamment les radicaux libres qui, par leur forte réactivité, donnent naissance aux autres produits aussi toxiques, expose les consommateurs aux effets indésirables tels que le stress oxydatif, les dommages des membranes cellulaires, de protéines et d'ADN, le risque accru des maladies chroniques telles que les maladies cardiovasculaires, le cancer et les atteintes hépatiques et rénales.

Mots-clés : Evaluation du risque, indice de peroxyde, indice d'acide, chromatogramme, valeur nutritionnelle.

ABSTRACT

In Burundi, studies focusing on food quality control, particularly for fried products like doughnuts, are rare. Doughnuts are widely consumed in Bujumbura and the surrounding area. However, the oils used are generally unstable and undergo various forms of alteration during storage and frying (hydrolysis, oxidation, and polymerization), which modify their physicochemical and organoleptic characteristics.

This study aimed to evaluate the quality of oils used for frying doughnuts sold in Bujumbura by determining their peroxide value, acid value, and lipid profile.

The peroxide value, acid value and lipid profile were determined respectively by the standard method ISO3960:2017/A1:2020, ISO 660:2020 and ISO12966-2:2017 for the preparation of fatty acid methyl esters (FAME) followed by ISO 12966-4:2026 for the analysis of FAME by gas chromatography-FID. The statistical analysis was performed using SPSS software. An average peroxide value of 36.33±24.60 meq O2/Kg , 36.83±25.95 meq O2/Kg , and 37.01±24.93 meq O2/Kg was found respectively in the communes of Ntahangwa, Mukaza and Mugere , all statistically equal (P>0.05) . According to the results of this study, fried products, particularly doughnuts made informally and sold in the city of Bujumbura, are generally hyperperoxidized (IP= 36.47±24.40 (meq O2/Kg .) and are out of standard (IP> 10(meq O2/kg). The mean acid value of 5.50 ± 2.49 mg KOH/g, 5.59 ± 2.71 mg KOH/g, and 5.74 ± 2.63 mg KOH/g were obtained in the communes of Ntahangwa , Mukaza , and Mugere , respectively, all statistically equivalent (P >0.05), corresponding to an overall acidity of 5.54 ± 2.57 mg KOH/g in the city of Bujumbura. According to the results of this study, it is clear that the oils used for frying doughnuts produced informally and sold are generally too acidic and fall outside the standards, as their acidity far exceeded 0.6 KOH/g (maximum acceptable value according to standards). Finally, the comparative analysis of fatty acid chromatograms from the control sample and the oil samples used for frying the doughnuts shows that the oils used for frying the doughnuts had qualitatively and quantitatively lost the fatty acids that consumers need, and their consumption exposes consumers to adverse effects. Indeed, the decomposition of fatty acids, producing potentially toxic products, notably free radicals, which, due to their high reactivity, generate other equally toxic products, exposes consumers to adverse effects such as oxidative stress, damage to cell membranes, proteins, and DNA, and an increased risk of chronic diseases such as cardiovascular disease, cancer, and liver and kidney damage.

Keywords: Risk assessment, peroxide value, acid value, chromatogram, nutritional value.

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY i
DEDICACES ii
REMERCIEMENTS iii
RESUME iv
ABSTRACT v
TABLE DES MATIERES vi
LISTE DES TABLEAUX ix
LISTE DES FIGURES x
AVANT PROPOS xi
0. INTRODUCTION GENERALE 1
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE 4
I.1. Généralités sur les huiles 4
I.1.1. Composition de la matière grasse 4
I.1.2. Importance des huiles dans la nutrition humaine 5
I.2. Notion de point de fumée et d'ébullition des huiles 5
I. 3. Facteurs de dégradation des huiles 7
I.3.1 Composition en acides gras 7
I.3.2. Température 7
I.3.3. Oxygène 7
I.3.4. Lumière 7
I.3.5. Humidité (eau) 7
I.3.6. Présence de métaux (catalyseurs) 8
I.3.7. Antioxydants naturels ou ajoutés 8
I.3.8. Traitements technologiques et raffinage 8
I.3.9. Emballage et conditions de stockage 8
I.4. Détérioration des huiles alimentaires 8
I.4.1. Altérations biologiques 9
I.4.2. Dégradation physique 9
I.4.3. Dégradation chimique 9
I.4.3.1. Oxydation 11
I.4.3.1.1. Facteurs d'oxydation 11
I.4.3.1.2. Mécanismes d'oxydation des acides gras 11
I.4.3.2. Polymérisation 13
I.4.3.2.1. Définition 13
I.4.3.2.2. Conséquences de la polymérisation 13

I.4.3.3. Hydrolyse....13
I.4.3.3.1.Définition....13
I.4.3.3.2. Conséquences d''hydrolyse des matières grasses....14
I.5. Conservation des huiles....14
I.6. Paramètres d'évaluation de la qualité des huiles....14
I.6.1. Evaluation des paramètres organoleptiques....14
I.6.2. Evaluation des paramètres physicochimiques....14
I.6.2.1.La densité....14
I.6.2.2.Indice de peroxyde(IP)....15
I.6.2.3. Indice d'acide(IA)....15
I.6.2.4.Indice d'iode(II)....15
I.6.2.5. Humidité ou teneur en eau....15
I.6.2.6.Indice de saponification....15
I.6.2.7. La teneur en savon....15
I.6.2.8. La teneur en matières insaponifiables....16
I.6.2.9. Le gossyplol....16
I.6.2.10.Indice de réfraction....16
I.7.2.11. Les caroténoïdes totaux....16
I.6.2.12. Les impuretés insolubles....16
I.6.2.13. La teneur en cuivre et fer....17
I.6.2.14. Teneur en matières volatiles....17
I.6.2.15. Le profil lipidique....17
I.6.2.15.1. Acides gras saturés....17
I.6.2.15.2. Acides gras insaturés....17
I.6.2.15.3. Acides gras trans....18
I.6.2.16. Indice d'ester....18
I.6.2.17.P-anisidine....18
I.6.2.18. Totox (oxydation totale)....19
I.6.2.19.TBA....19
I.6.2.20. La viscosité....19
I.6.2.21. Le test rancimat....19
I.6.2.22. Taux des composes polaires....19
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES....20
I1.1. Lieu d'étude....21
II.2. Taille de l'échantillon....21
II.3. Matériel et protocole d'analyse des paramètres étudiés....22

II. 3.1. Indice de peroxyde 22
II.3.1.1. Matériel et réactifs 23
II.3. 1.2. Protocole d'analyse (ISO3960 :2017/A1 :2020) 25
III.3. 2. Indice d'acidité 26
II.3.2.1. Matériel et réactifs 27
II.3.2.2. Protocole (ISO 660 :2020) 28
II.3. 3. Profil lipidique 29
II.3.3.1. Matériel et réactifs 29
II.3.3.2. Protocole (ISO12966-2:2017) 30
II.4. L'encodage et traitement des données 31
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS 32
III. 1. Indice de peroxyde(IP) 32
III.2. Indice d'acide(IA) 35
III. 3. Profil lipidique 38
CONCLUSION 42
RECOMMANDATIONS ET SUGGESTIONS 44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 45
ANNEXES 48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Point de fumée des huiles végétales alimentaire.....6

Tableau 2: Type d'altérations, agent causal et types de produits formés lors du chauffage des corps gras (Perrin, 1992 .; Dobarganes, 1998 ;.Azzedine, 2007).....10

Tableau 3 : Les principaux produits de dégradation des huiles de friture et leurs effets.....11

Tableau 4 : Normes de qualité des paramètres physicochimiques des huiles alimentaires.....20

Tableau 5: Lieux d'échantillonnage.....21

Tableau 6 : Matériel et réactifs utilisés dans l'analyse de l'indice de peroxyde.....23

Tableau 7 : Matériel et réactifs utilisés dans l'analyse de l'indice d'acide.....27

Tableau 8 : Matériel et réactifs utilisés dans l'analyse des acides gras 29

Tableau 9 : Résultats d'indice de peroxyde au niveau des quartiers et leur commune respective ainsi que la moyenne générale.....33

Tableau 10 : Résultats d'analyse de la variance d'indices de peroxyde des échantillons des quartiers explorés 33

Tableau 11 : Résultats d'indice d'acidité au niveau des quartiers et leur commune respective ainsi que la moyenne générale.....36

Tableau 12 : Résultats d'analyse de la variance d'indices d'acidité des échantillons des quartiers explorés 37

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Composition de la matière grasse (CHARREYRON, 2014) 4
Figure 2: Schéma simplifié des voies d'altération des lipides (Belitz et al., 2004) 10
Figure 3: Schéma général de l'oxydation des lipides (Eymard , 2003) 12
Figure 4: Echantillons étudiés d'huiles de palme raffinées et les beignets 22
Figure 5: Quelques matériels utilisés (a. béchers, 2. Agitateurs magnétiques, 3. Balance analytique, 4. Téflons et lève-téflons et équipement de titrage) 24
Figure 6: Réactifs utilisés (chloroforme, iodure de potassium, empois d'amidon, thiosulfate de sodium et acide acétique) 24
Figure 7 : La pesée de l'échantillon, processus de titrage, apparence de l'échantillon pendant l'homogénéisation sur l'agitateur magnétique, avant et après le point d'équivalence 26
Figure 8: Quelques matériels utilisés (1. Balance analytique, 2. Agitateur magnetique, 3. Etude pour le séchage des béchers, 4.plaque chauffante, 5. Béchers) 27
Figure 9 : Produits utilisés (phénolphtaléine brute, 2. Ethanol, 3. Hydroxyde de potassium 4. Solution de phénolphtaléine utilisée comme indicateur coloré) 28
Figure 10 : Matériel utilisé (1 & 2 : GC ; 3,4 & 5 : Paramétrage du GC, chargement du Vial & observation du séquençage d'acides gras) 30
Figure 11 : Produits utilisés (De gauche à droite : acide sulfurique, hydroxyde de sodium, méthanol, hexane et sulfate de sodium anhydre) 30
Figure 12 : Chromatogramme d'acides gras de l'échantillon témoin (huiles non encore utilisées) 39
Figure 13: Chromatogramme d'acides gras d'huiles ayant été utilisées dans la fabrication des beignets (b) 40
Figure 15 : Chromatogramme d'acides gras d'huiles ayant été utilisées dans la fabrication des beignets(c) 41

AVANT PROPOS

Cette étude a été réalisée dans le cadre de l'obtention du diplôme de master en sciences des aliments et nutrition, option : sécurité alimentaire et changement climatique. Elle évalue la qualité des produits frits en particulier les beignets, des produits farineux largement consommés au Burundi et surtout dans la ville de Bujumbura et ses zones périphériques. Les huiles alimentaires utilisées pendant la friture sont sensibles et subissent diverses formes de détérioration (oxydation, hydrolyse polymérisation) en cas de mauvaises pratiques de production, de conservation et d'utilisation ce qui modifie par conséquent leurs propriétés physicochimiques et organoleptiques. En effet, une neutralisation incomplète lors raffinage rend les huiles plus acides, les mauvaises conditions de stockage peuvent accentuer leur acidité et provoquer la formation des radicaux libres qui rend les huiles facilement oxydables , les pratiques culinaires inadéquates (surchauffe, réutilisation excessive) provoquent la formation des produits indésirables potentiellement toxiques notamment les péroxydes, les hydropéroxydes , les adéhydes, les cétones , des polymères cycliques et acycliques, acroléine….etc.

De ce qui précède, le contrôle de la qualité des produits s'avère nécessaire pour évaluer le risque lié à leur consommation. Les résultats de cette étude peuvent servir de base dans la prise des décisions pour protéger la santé des consommateurs. Dans ce contexte, nous avons choisi d'effectuer le contrôle de la qualité des produits frits issu de la transformation informelle en particulier les beignets, très vendus, consommés et appréciés par des gens de tout âge. Cette étude de type exploratoire fournit des données qui, dans une certaine mesure peuvent éveiller les consommateurs, les producteurs des aliments frits en particulier les beignets, les industriels producteurs des huiles alimentaires et l'Etat à travers son cadre légale de la normalisation des produits commercialisés, le Bureau Burundais de Normalisation(BBN).

0. INTRODUCTION GENERALE

Les techniques de préparation des aliments ont évolué au fil du temps et ont permis de rendre consommables des aliments qui, sans cuisson, seraient indigestes ou parfois nocifs (Tessier, 2012). Toutefois, la cuisson entraîne des modifications physiques et chimiques, notamment la dénaturation des protéines, la réaction de Maillard, la caramélisation, l'oxydation des lipides et la perte de certaines vitamines, affectant ainsi les propriétés nutritionnelles et organoleptiques des aliments (Scurtul, 2024).

Parmi les différentes méthodes de cuisson, la friture est l'une des plus anciennes et des plus répandues dans les ménages, les restaurants et l'industrie agroalimentaire (Zhang et al., 2022). Elle consiste à immerger les aliments dans une huile chauffée à haute température, permettant simultanément leur cuisson, leur déshydratation, le développement de leur texture et de leurs arômes (Ilyas, 2017). Bien que cette technique améliore les qualités sensorielles des aliments, la réutilisation des huiles ou leur exposition prolongée à des températures élevées favorise des réactions d'oxydation, d'hydrolyse, de polymérisation et d'isomérisation, conduisant à la formation d'acides gras trans et de composés toxiques tels que l'acrylamide, l'acroléine et les hydrocarbures aromatiques polycycliques, susceptibles d'accroître le risque de maladies cardiovasculaires, d'athérosclérose et de cancers (Souleymane et al., 2024,Choe & Min, 2007).

Malgré ces risques, les lipides demeurent essentiels à l'organisme en raison de leur rôle comme source d'énergie, d'acides gras essentiels, de vitamines liposolubles et de leur contribution aux qualités organoleptiques des aliments (Ait & Azzoune , 2019).

Les huiles végétales fournissent également des acides gras indispensables, des phytostérols et divers composés bioactifs contribuant à la qualité nutritionnelle et sensorielle des aliments (Cuvelier & Maillard, 2012). Cependant, elles sont particulièrement sensibles à l'oxydation au cours du stockage et de la friture, ce qui altère leurs propriétés physicochimiques et organoleptiques. L'ampleur de cette dégradation dépend notamment du type d'huile, de la nature de l'aliment, de la température, de la durée de chauffage, de l'incorporation d'air et des conditions de friture (Laceb & Louerguioui, 2022,Bordin et al., 2013).

Les acides gras insaturés sont particulièrement vulnérables aux réactions d'oxydation, d'hydrolyse, de polymérisation et d'isomérisation cis-trans. Même dans des conditions de friture maîtrisées, des produits de dégradation se forment, bien que les composés polaires totaux demeurent généralement à des concentrations inférieures aux seuils de risque lorsqu'ils sont correctement contrôlés (Combe & Rossignol, 2010).

La sécurité sanitaire des aliments constitue donc aujourd'hui un enjeu majeur de santé publique. Selon la FAO (2021), près de 600 millions de personnes contractent chaque année une maladie liée à la consommation d'aliments contaminés ou de mauvaise qualité. Au Burundi, où les beignets sont largement consommés, les études portant sur la qualité des huiles de friture demeurent très limitées. Pourtant, ces huiles sont souvent réutilisées à plusieurs reprises, ce qui accélère leur dégradation et peut compromettre leur innocuité.

Dans le but de contribuer à l'évaluation de la qualité des huiles utilisées pour la friture des beignets à Bujumbura, des échantillons ont été collectés dans les communes de Ntahangwa, Mukaza et Mugere. En restauration, le contrôle de la qualité des huiles repose sur plusieurs critères, notamment la durée d'utilisation, le dégagement de fumée, la formation de mousse, le changement de couleur, le pourcentage d'acides gras libres, l'indice de peroxyde, l'indice d'acidité, la teneur en p-anisidine, les composés polaires totaux et la température de friture (Cristina et al., 2013). Toutefois, en raison de la complexité des analyses et des contraintes budgétaires, il est souvent difficile d'évaluer l'ensemble de ces paramètres. Parmi les indicateurs les plus pertinents figurent l'indice de peroxyde, qui renseigne sur les produits primaires de l'oxydation, l'indice d'acidité, qui reflète l'hydrolyse des triglycérides en acides gras libres, et le profil lipidique, qui permet de déterminer la composition en acides gras saturés, monoinsaturés, polyinsaturés et trans. Ces paramètres constituent des outils fiables pour apprécier le degré d'altération des huiles de friture et les risques potentiels liés à leur consommation (Bordin et al., 2013).

Ainsi, nous nous sommes posés certaines questions :

- Quels sont les niveaux d'indices de peroxydation et d'acidité dans les huiles de friture des beignets dans la ville de Bujumbura?
- Ces paramètres respectent-ils les normes recommandées par le Codex Alimentarius?
- Est-ce que les huiles utilisées contiennent suffisamment d'acides gras ?

Pour répondre à ces questions, les hypothèses suivantes ont été formulées :

- H1 : Les huiles de friture utilisées dans la fabrication des beignets à Bujumbura présentent un taux élevé de peroxydes et d'acides gras libres
- H2: Les valeurs d'indices de peroxydation et d'acidité des huiles utilisées dans la friture des beignets dépassent généralement les normes du Codex Alimentarius
- H3 : En raison de la mauvaise conservation, le surchauffe et la réutilisation des huiles utilisées dans la friture des beignets, leur composition en acides gras diminue qualitativement et quantitativement.

C'est pour répondre aux questions de recherche susmentionnées et d'infirmer ou confirmer les hypothèses de recherche ci-dessus formulées que nous avons choisi pour thème de recherche :

« Etude d'altération des huiles utilisées dans la fabrication des beignets commercialisés dans la ville de Bujumbura ».

L'objectif global de cette étude est d'évaluer la qualité des huiles utilisées dans la friture des beignets commercialisés dans différents points de vente, en analysant trois paramètres notamment les indices de peroxyde et d'acidité et le profil lipidique. Les résultats obtenus permettront de juger de l'état de dégradation des huiles utilisées, et donc de leur innocuité pour les consommateurs.

Spécifiquement, nous allons :

1. Mesurer les niveaux de peroxydation et d'acidité des huiles échantillonnées.
2. Vérifier si les valeurs des paramètres étudiés sur huiles de friture des beignets respectent les standards du Codex Alimentarius
3. Décrire la composition en acides gras des huiles utilisées dans la friture des beignets.

A part cette introduction, le présent travail s'articule autour de trois chapitres. Le premier chapitre porte sur la revue de la littérature. Le deuxième chapitre décrit le matériel et les différentes méthodes utilisées pour la collecte et le traitement des données. Le troisième chapitre est consacré aux résultats et discussions. Le travail termine par une conclusion et différentes recommandations et suggestions.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE

I.1. Généralités sur les huiles

I.1.1. Composition de la matière grasse

Les huiles végétales se définissent essentiellement par leur composition en acides gras. Aucune ne contient un seul type d'acides gras : il s'agit toujours d'une association complexe. Les huiles végétales n'ont cependant pas une composition fixe, car elles varient selon les arrivages, la génétique et la culture des plantes, les saisons… (Lecerf, 2015).

La composition des huiles varie selon la source végétale (colza, olive, tournesol) et les traitements (extraction, raffinage), rendant certaines plus riches en oméga-3 (lin), oméga-9 (olive) ou vitamine E (tournesol).

Les huiles végétales sont essentiellement constituées de :

- Triglycérides, appelés aussi triacylglycérols (TAG) (95-98%) : esters formés de glycérol et d'acides gras pouvant être saturés ou insaturés (mono insaturées ou polyinsaturés).
- Acides gras essentiels : acide alpha linolénique (omega-3), acide linoléique (omega-6),
- Omega-9 =acide oléique,
- Constituants mineurs : Stérols, tocophérols (vitamine E), pigments, polyphénols, etc., qui apportent des propriétés nutritionnelles et sensorielles.

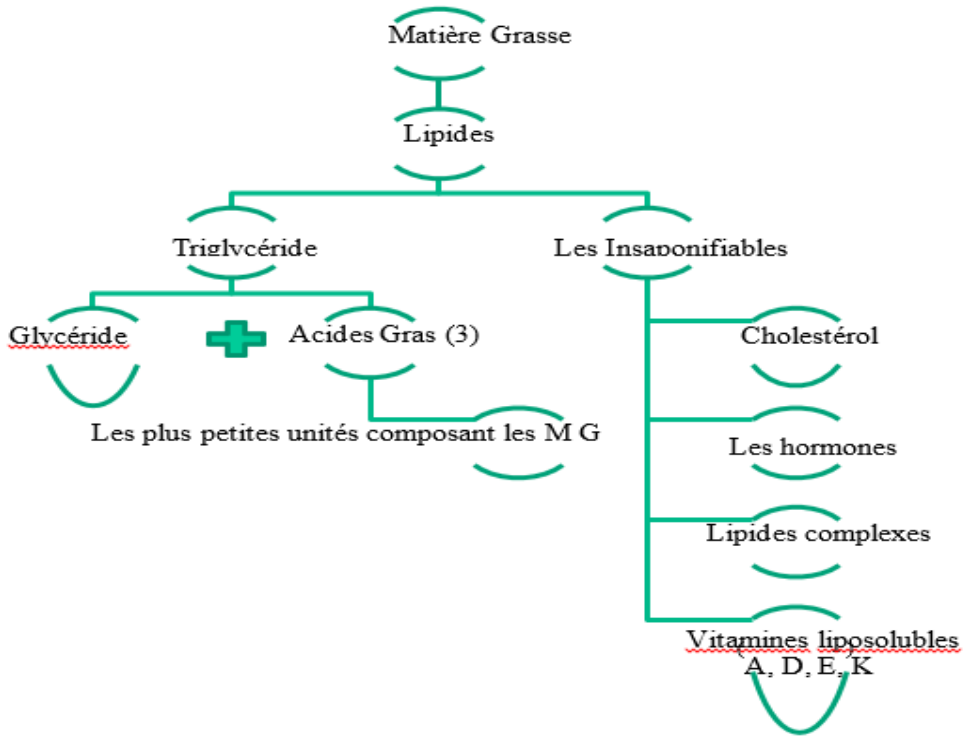


Figure 1: Composition de la matière grasse (CHARREYRON, 2014)

I.1.2. Importance des huiles dans la nutrition humaine

Selon Combe & Rossignol-castera(2010), les lipides ont trois rôles distincts :

a. Source d'énergie

Ce rôle énergétique est principalement assuré par les acides gras saturés, voire les acides gars monoinsaturés, grâce à leur potentiel d'oxydation biologique (β oxydation) qui génère de l'ATP. Ce sont les meilleurs réserves énergétiques (un gramme de lipides apporte 9 kCal. Ils sont la source d'énergie de longue durée(le corps stocke les lipides dans les tissus adipeux pour les périodes de jeûne, froid, effort long) et économisent les protéines (lorsque le corps a assez de lipides, il ne brule pas les muscles pour faire de l'énergie).

b. Source d'acides gras essentiels et de vitamines liposolubles (A, D, E et K)

Les huiles végétales représentent une source intéressante d'acides linoléique (C18 : 2 n-6) et alpha-linolénique (C18 : 3 n-3), considérés comme acides gras polyinsaturés essentiels et indispensables dans l'alimentation (l'organisme humain ne peut pas les synthétiser). Le premier est le précurseur d'acide arachidonique (C20 : 4 n-6) tansisque le second est le prcurseur d'acide eicosapentaénoïque (EPA, C20 : 5 n-3) et d'acide docosahexaénoïque (DHA, C22 : 6 n-3), aux fonctions essentielles à la vie (agrégation plaquettaire, inflammation, immunité, etc.).

c. Rôle structural

Les acides gras, sous la forme de phospholipides, constituent l'ossature des membranes cellulaires. Les acides gras polyinsaturés apportés par les huiles végétales et leurs dérivés métaboliques contribuent à la part importante du contenu membranaire dont les principaux sont l'acide linoléique (C18 : 2 n-6), l'acide arachidonique (C20 : 4 n-6) et l'acide docosahexaénoïque (C22 : 6 n-3).

d. Rôles fonctionnels et hormonaux

Ils participent à la fabrication d'hormones (oestrogènes, testostérone, cortisol...) et à l'absorption des vitamines liposolubles, sans lipides, le corps ne les absorbe pas.

e. Rôles de protection

Ils jouent le rôle d'amortisseur en protégeant les organes vitaux, d'isolant thermique (les tissus adipeux sous-cutanés maintiennent la température du corps constante. Ils empêchent également la déshydratation (lubrification du corps par le sébum secrété par les glandes sébacées).

I.2. Notion de point de fumée et d'ébullition des huiles

Le point de fumée est la température critique (105°C-240°C) à laquelle une huile se décompose en fumée, devient toxique et perd ses qualités nutritionnelles. Il est bien inférieur à la température d'ébullition (généralement >300 °C). Les acides gras insaturés étant plus sensibles que les acides gras saturés et plus l'insaturation augmente, plus l'huile la dégradation devient rapide.

Pour la friture, il est essentiel de faire recourt à des huiles à haut point de fumée (>210°C) comme d'arachide, d'avocat ou de tournesol raffiné, pépin de raisin et de sésame raffinée. Au-dessus de la température de fumée, l'huile brûle et devient dangereuse en formant par exemple l'acroléine, un produit très cancérigène.

Tableau 1: Point de fumée des huiles végétales alimentaire (https://lavieillechouette.com/les%20%20PDF/point%20fum%C3%A9e%20huiles.pdf)

Types d'huiles	**Point de fumée**
Colza vierge	107 °C
Lin vierge	107 °C
Carthame vierge	107 °C
Tournesol vierge	107 °C
Maïs vierge	160 °C
Tournesol oléique vierge	160 °C
Olive extra vierge	160 °C
Arachide vierge	160 °C
Carthame semi-raffinée	160 °C
Soja vierge	160 °C
Noix vierge	160 °C
Beurre	177 °C
Colza semi-raffinée	177 °C
Noix de coco	177 °C
Sésame vierge	177 °C
Soja semi-raffinée	177 °C
Lard	182 °C
Macadamia	199 °C
Colza raffinée	204 °C
Noix semi-raffinée	204 °C
Olive extra vierge grde qualité	207 °C
Sésame	210 °C
Coton	216 °C
Pépins de raisin	216 °C
Olive vierge	216 °C
Amande	216 °C
Noisette	221 °C
Arachide	227 °C
Tournesol	227 °C
Maïs	232 °C
Tournesol oléique	232 °C
Carthame	232 °C
Soja	232 °C
Palme	240 °C
Olive extra légère	242 °C

Huile vierge : huile obtenue par pressage mécanique à froid ou à chaud sans ajout de solvant chimique

Huile raffinée : huile extraite puis traitée chimiquement

I. 3. Facteurs de dégradation des huiles

I.3.1 Composition en acides gras

La sensibilité à l'oxydation dépend fortement du degré d'insaturation des acides gras de l'huile (Gharby et al., 2025):

- Les acides gras polyinsaturés (AGPI) (ex. linoléique, linolénique) sont beaucoup plus susceptibles à l'oxydation que les acides gras saturés.
- Plus il y a de doubles liaisons, plus l'huile s'oxyde rapidement, formant des peroxydes, aldéhydes et autres produits de dégradation.

I.3.2. Température

La vitesse d'oxydation augmente avec la température (Gharby et al., 2025):

- Une élévation de la température accélère considérablement les réactions d'oxydation chimique.
- À des températures élevées, les hydroperoxydes se décomposent rapidement, favorisant la formation de produits secondaires.

I.3.3. Oxygène

L'oxygène de l'air est également l'un des facteurs les plus importants de dégradation :

- Il déclenche l'auto-oxydation des lipides (FAO, 1994).
- Plus la concentration d'oxygène est élevée, plus l'oxydation est rapide (**https://www.huataioilmachine.com/news/huatai-news/edible-oil-production.html).**

I.3.4. Lumière

L'énergie lumineuse, en particulier les UV, provoque une photo-oxydation **(https://www.huataioilmachine.com/news/huatai-news/edible-oil-production.html):**

- Elle initie des réactions radicalaires qui accélèrent l'oxydation.
- L'exposition à la lumière du jour augmente la peroxydation et le rancissement.

I.3.5. Humidité (eau)

L'activité de l'eau (Aw), représentant l'eau libre disponible, est un facteur critique de dégradation des matières grasses, favorisant l'hydrolyse des lipides et le développement de micro-organismes.

Une activité de l'eau élevée (Aw > 0.7) accélère le rancissement hydrolytique, tandis que des valeurs faibles (0.3-0.4) minimisent l'oxydation. Elle influence directement donc la stabilité et la durée de conservation des huiles (https://www.huataioilmachine.com/news/huatai-news/edible-oil-production.html).

I.3.6. Présence de métaux (catalyseurs)

Des traces de métaux (fer, cuivre, Manganèse.cuivre,cobalt) accélèrent aussi l'oxydation car ils catalysent la formation de radicaux libres (https://www.huataioilmachine.com/news/huatai-news/edible-oil-production.html). Ces métaux catalysent l'oxydation en générant des radicaux libres, avec leur instabilité, ils amorcent d'autres réactions dont les produits sont potentiellement dangereux.

I.3.7. Antioxydants naturels ou ajoutés

Selon Cuvelier & Maillard (2012), la présence dans l'huile des composés antioxydants tels que tocophérols (vitamine E) et phénols protège l'huile contre l'oxydation.

I.3.8. Traitements technologiques et raffinage

Le processus de raffinage réduit les antioxydants naturels et peut rendre l'huile plus susceptible à l'oxydation. La qualité initiale de l'huile (dégradation ou pré-oxydation avant stockage) influence ainsi sa stabilité (Cuvelier & Maillard, 2012).

I.3.9. Emballage et conditions de stockage

La protection contre la lumière, l'oxygène et la température dépend du choix du contenant. Ainsi, les emballages opaques ou métalliques, vides d'air et température basse prolongent la durée de conservation des huiles.

I.4. Détérioration des huiles alimentaires

L'altération des huiles alimentaires constitue un problème majeur en industrie des corps gras. En effet, il est évident que l'oxydation des huiles conduit en général à des conséquences indésirables, en portant préjudice aux qualités organoleptiques (arômes, gout, odeur), nutritionnelles (perte de vitamines liposolubles et d'acides gras essentiels) et dans des conditions extrêmes, des substances toxiques peuvent se former. Ces altérations peuvent causer des pertes considérables tant sur le plan alimentaire que sur le plan économique (Melissa, 2022). La détérioration des huiles alimentaires, dont la cause est l'exposition à l'oxygène, à la lumière, à la chaleur et aux métaux traces (qui catalysent l'oxydation), est principalement liée à l'oxydation (réaction avec l'oxygène) avec formation des peroxydes et composés volatils dégradés, à l'hydrolyse (dégradation par l'eau), libérant des acides gras libres et à la polymérisation (surtout à haute température), produisant des polymères indésirables.

I.4.1. Altérations biologiques

La détérioration biologique des huiles comestibles englobe toute la dégradation causée par l'action des micro-organismes et des enzymes lipolytiques, affectant leur qualité sanitaire et nutritionnelle, notamment la perte de vitamines liposolubles, en particulier la vitamine E, qui joue un rôle antioxydant (Belitz et al. , 2004). En effet, les huiles végétales sont peu altérées par les micro-organismes; elles subissent généralement des changements physico-chimiques. Cependant, les germes lipolytiques peuvent parfois participer à des phénomènes d'hydrolyse et d'oxydation (Melissa, 2022). Ces micro-organismes produisent des lipases, enzymes capables d'hydrolyser les triglycérides en acides gras libres et en glycérol. Cette réaction enzymatique est appelée rancissement hydrolytique.

I.4.2. Dégradation physique

La détérioration physique des huiles alimentaires désigne l'ensemble des modifications non chimiques et non biologiques qui affectent leur aspect, leur texture et leurs propriétés physiques sans altérer directement leur structure moléculaire comme la variation de la viscosité, changement de couleur, changement d'état,…etc. Ces modifications résultent principalement de l'influence de facteurs environnementaux tels que la température, la lumière, l'oxygène et la durée de stockage (Gunstone, 2011).

I.4.3. Dégradation chimique

L'altération chimique des huiles alimentaires correspond à l'ensemble des réactions chimiques qui modifient la structure des lipides et entraînent une dégradation de la qualité nutritionnelle, sensorielle et sanitaire des huiles. Elle est principalement dominée par les phénomènes d'oxydation, d'hydrolyse chimique et de polymérisation des acides gras (Melissa, 2022).

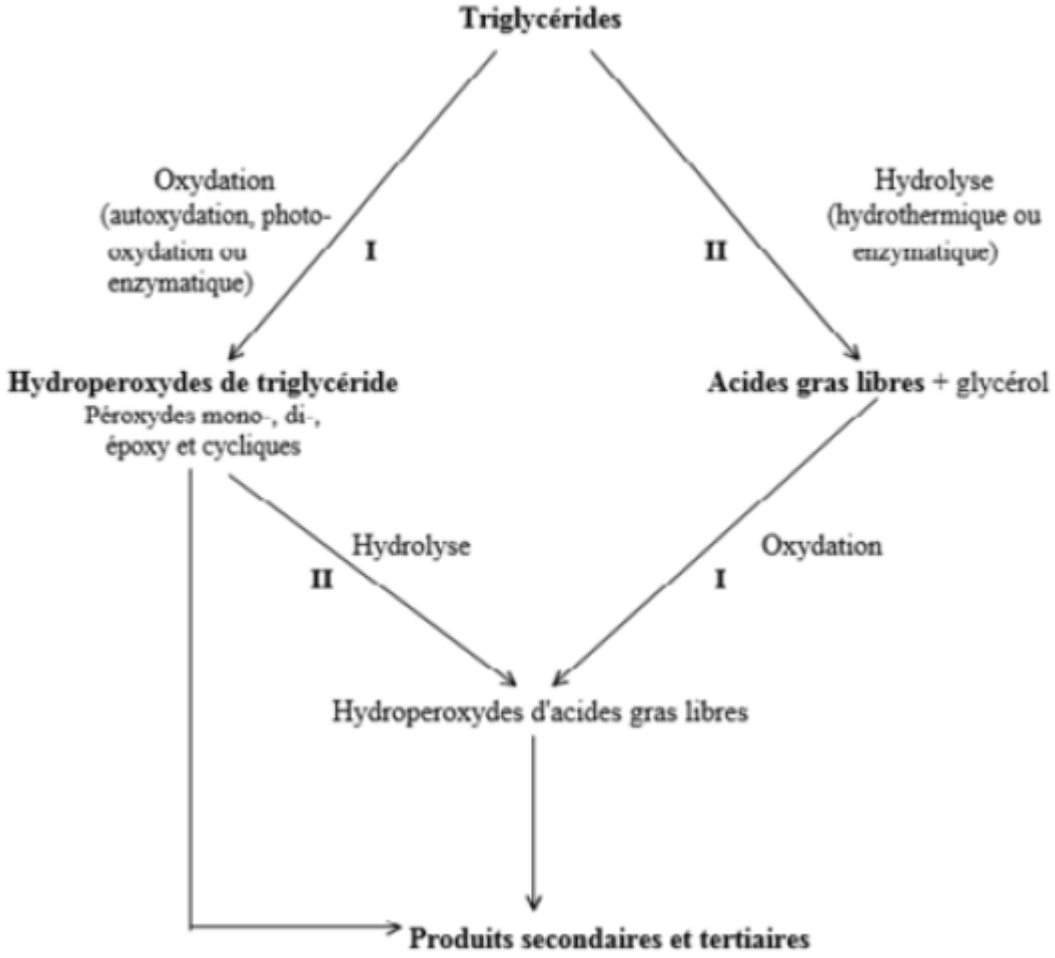


Figure 2: Schéma simplifié des voies d'altération des lipides (Belitz et al., 2004)

Tableau 2: Type d'altérations, agent causal et types de produits formés lors du chauffage des corps gras (Perrin, 1992 .; Dobarganes, 1998 ;.Azzedine, 2007).

Type d'altération	Agent causal	Composés resultants
Oxydative	Air (Oxygène)	**Produits non volatiles :** -Monomères oxydés. -dimères et oligomères. -polymères oxydés. **produits volatils :** -Hydrocarbures, cétones, Aldéhydes, alcools.
Thermique	température	Monomères cycliques. -Dimères apolaires. -polymères -Acides gras trans. (AGT)
Hydrolytique	humidité	Acides gras libres (AGL). -Diglycérids. -Mono glycérides. -glycérol.

Tableau 3 : Les principaux produits de dégradation des huiles de friture et leurs effets

Les produits de dégradation	**Les effets toxiques**
Hydroperoxydes	Dysfonctionnement enzymatique de la muqueuse intestinale. -Induction de la prolifération cellulaire du colon.
Epoxydes, triglycérides et acides gras oxydés	Hypertrophie hépatique. -Dysfonctionnement des enzymes hépatiques.
Les composés secondaires	-Hépatotoxicité, mutanogénocité.
Les monomères cycliques oxydés	Retardement de croissance et mortalité.
Dimères et oligomères non oxydés	Diarrhées.
Dimères oxydés	Retardement de la croissance.
Oligomères oxydées	Retardement de la croissance.
Oxystérols variables	Cytotoxicité et mutagenocité.
Acides gras trans (AGT)	Risque des maladies cardiovasculaires.

I.4.3.1. Oxydation

I.4.3.1.1. Facteurs d'oxydation

Les facteurs qui influencent l'oxydation des lipides sont nombreux. Il s'agit d'une part de facteurs intrinsèques, tels que la composition en acides gras insaturés (concentration et nombre d'insaturations), l'activité de l'eau, la présence de pro-oxydants (ions métalliques, hèmes, enzymes) ou d'antioxydants naturels (tocophérols, caroténoïdes, etc.), et d'autre part de facteurs environnementaux dont les principaux sont la température, la lumière et la pression partielle en oxygène (Boukazoula, 2021).

Les huiles végétales riches en acides gras insaturés sont susceptibles de s'oxyder. La présence d'une double liaison dans la chaîne hydrocarbonée d'acides gras affaiblit les liaisons C-H de l'atome de carbone se trouvant à côté de la double liaison et ainsi facilite l'abstraction de l'hydrogène (H).
L'oxydation génère un radical libre suite à une réaction catalysée par la chaleur, la lumière, des traces de métaux ou des enzymes. L'oxydation des lipides est l'une des causes principales de la détérioration de la qualité d'un aliment ; elle diminue la qualité nutritionnelle, altère le goût, modifie la texture et l'aspect de la denrée et raccourcit sa durée de conservation.

I.4.3.1.2. Mécanismes d'oxydation des acides gras

L'oxydation lipidiques se déroule en trois phases distinctes (Boukazoula, 2021):

- phase d'initiation : lente, elle correspond à la formation des radicaux libres ;
- phase de propagation : rapide, elle correspond à la formation, à partir des radicaux libres, des peroxydes et à l'apparition consécutive des composés secondaires d'oxydation ;
- phase de terminaison : elle correspond à la disparition des peroxydes, à l'accumulation des composés secondaires d'oxydation, c'est-à dire à l'oxydation complète du substrat.

La phase de propagation peut elle-même être découpée en deux étapes séquentielles :

- ✓ La première étape correspond à l'apparition des peroxydes, composés primaires d'oxydation, à partir des radicaux libres instables : la quantité de peroxydes formés peut être évaluée analytiquement grâce à la détermination de l'indice de peroxyde. À ce stade, dit de peroxydation, la flaveur de rance peut ne pas être perceptible, la qualité marchande du produit non encore altérée ;
- ✓ La deuxième étape se traduit par l'évolution des hydroperoxydes en composés secondaires d'oxydation, par deux voies principales :
  - o une voie dite *de scission*, conduisant par coupure à la libération de composés volatils (chaînes carbonées courtes et moyennes), notamment aldéhydiques, responsables des flaveurs de rance, caractérisés par un seuil de détection très faible ;
  - o une voie dite de *remaniement*, conduisant suite à différents types de pontage intra- ou interacides gras ou suite à l'apparition de fonctions oxydées (fonctions cétone, époxy, hydroxy) sur les acides gras, à la formation d'acides gras oxydés, de triglycérides oxydés, de polymères de triglycérides oxydés. À ce stade dit de rancissement, la flaveur de rance est bien entendue perceptible, et peut être accompagnée par d'autres conséquences d'ordre fonctionnel (aspect, couleur, texture) et d'ordre physiologique (altérations des acides gras essentiels et des vitamines liposolubles).

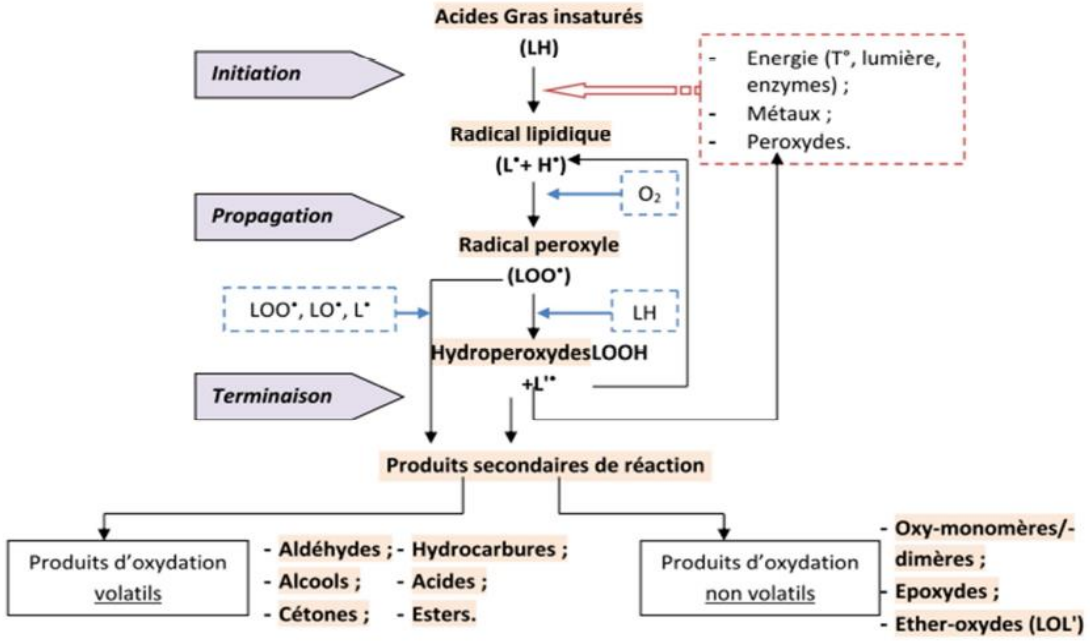


Figure 3: Schéma général de l'oxydation des lipides (Eymard , 2003)

En fonction des agents initiateurs(Melissa, 2022), l'oxydation des lipides est classée en trois types.

- ➢ l'auto-oxydation qui est catalysée par la température, les ions métalliques et les radicaux libres .Les acides gras insaturés (AGI) réagissent avec l'oxygène pour former des hydroperoxydes

qui génèrent par dégradation de petites molécules : les hydrocarbures, aldéhydes et des cétones (Benhamou, 2017)

- la photo-oxydation qui est initiée par la lumière en présence de photo-sensibilisateurs,
- l'oxydation enzymatique qui est initiée par la lipoxygénase et la cyclooxygénase.

I.4.3.2. Polymérisation

I.4.3.2.1. Définition

La polymérisation est une forme de dégradation chimique des huiles lorsque les huiles sont soumises à des traitements thermiques comme la friture. Elle résulte principalement de réactions radicalaires impliquant les acides gras insaturés (Choe & Min, 2007). Sous l'effet de températures élevées (≥ 150–180 °C), les doubles liaisons des acides gras insaturés subissent une oxydation thermique, générant des radicaux libres, qui, s'ils se rencontrent, ils forment des dimères, trimères et polymères d''acides gras.

I.4.3.2.2. Conséquences de la polymérisation

La polymérisation des huiles, survenant lors de chauffages répétés à haute température (friture), dégrade fortement leur qualité et représente un danger pour la santé. Elle augmente le taux de composés polaires (idéalement < 25%), rend l'huile visqueuse, sombre et toxique. Ces composés augmentent les risques des maladies cardiovasculaires, cancérigènes et hépatiques (https://sanipousse.com/portfolio/tests-de-degradation-huiles-de-friture/).

I.4.3.3. Hydrolyse

I.4.3.3.1. Définition

L'hydrolyse des huiles (triglycérides) est une réaction chimique scindant les graisses en glycérol et acides gras libres, généralement en présence d'eau et d'un catalyseur.

Les réactions d''hydrolyses sont de loin les plus nombreuses dans les conditions normales de friture. Elles conduisent, au contact de la vapeur d'eau, à la formation d'acides gras libres, de monoglycérides, de di-glycérides, voire de glycérol. Ces composés sont alors très sensibles aux réactions d'oxydation et de polymérisation et les produits qui en dérivent sont responsables des principaux défauts de gout ou d'odeur(Ilyas, 2017).

Il existe deux types d'hydrolyse (Trimoliere, 1984 ; Ilyas, 2017) :

- Hydrolyse enzymatique : cette réaction se déroule seulement dans les huiles brutes ; au cours du stockage et du transport de la matière première. Les enzymes responsables de cette hydrolyse sont les lipases

- Hydrolyse spontanée : Elle a lieu au cours du stockage et du traitement thermique des huiles, elle est favorisée par la présence des acides gras libres et le taux d'humidité. Cette hydrolyse s'accompagne par une oxydation, car les acides gras libres s'oxydent 10 fois plus vite que les triglycérides.

I.4.3.3.2. Conséquences d''hydrolyse des matières grasses

L'hydrolyse des huiles, provoquée par la présence d'eau, dégrade les triglycérides en acides gras libres et glycérol, augmentant l'acidité et provoquant le rancissement. Les conséquences incluent une dégradation de la qualité (goût, odeur), une diminution de la stabilité des additifs, et des risques de sécurité comme la formation de mousse ou l'augmentation du point d'éclair. Chez le consommateur, l'inflation peut en résulter.

I.5. Conservation des huiles

Les bonnes pratiques de conservation des huiles alimentaires (comestibles) reposent sur la maîtrise des facteurs de dégradation (oxygène, lumière, chaleur), l'utilisation de bonnes pratiques de conditionnement et d'entreposage et le suivi de critères de qualité. Des stratégies modernes, telles que les antioxydants ou les films protecteurs, permettent d'optimiser la durée de vie utile des huiles tout en préservant leur qualité nutritive et sensorielle.

La conservation correcte est essentielle pour :

- prévenir la dégradation chimique ;
- préserver les qualités organoleptiques (goût, arôme) ;
- maintenir la valeur nutritionnelle ;
- éviter les risques sanitaires liés aux produits de dégradation.

I.6. Paramètres d'évaluation de la qualité des huiles

I.6.1. Evaluation des paramètres organoleptiques

La couleur, l'odeur et la saveur de chaque produit doivent être caractéristiques du produit désigné. Celui-ci doit être exempt de saveur et d'odeur étrangères et de toute rancidité(Codex Alimentarius, 2009).

I.6.2. Evaluation des paramètres physicochimiques

I.6.2.1.La densité

C'est le rapport de la masse d'un certain volume d'huile à 20°C et la masse d'un volume égal d'eau distillée à la même température (Diakite et al., 2022).

I.6.2.2. Indice de peroxyde(IP)

L'indice de peroxyde est une mesure permettant d'estimer la quantité de peroxyde présent dans une matière grasse. Il indique le niveau d'oxydation primaire(Diakite et al., 2022). L'indice de peroxyde est une mesure du nombre total des peroxydes dans l'huile, exprimée en milliéquivalent de O2*kg d'huile (méq O2 / kg d'huile).

I.6.2.3. Indice d'acide(IA)

L'acidité d'un corps gras est la quantité de potasse en mg nécessaire pour neutraliser son acidité libre. La teneur en acides libres des corps gras augmente avec le temps. L'indice d'acide permet donc de juger de leur état de détérioration(Diakite et al., 2022).

L'acidité renseigne sur le taux d'acides gras libres présents dans une huile ; elle permet d'estimer le degré d'altération hydrolytique, favorisé par la présence d'eau dans l'aliment.

I.6.2.4. Indice d'iode(II)

L'indice d'iode est la mesure de degré d'insaturation d'une matière grasse en déterminant le nombre d'iode (gramme) se fixant sur les doubles liaisons présentes dans 100 g de lipides. Il est utilisé pour la détermination de l'insaturation de l'huile (Diakite et al., 2022). Au fur et à mesure que l'oxydation d'une graisse progresse, le nombre d'instaurations diminue et donc l'indice iodé diminue.

I.6.2.5. Humidité ou teneur en eau

C'est la perte en masse subie par l'échantillon après chauffage. Elle est exprimée en pourcentage de masse(Diakite et al., 2022). La présence d'humidité confirme la présence d'une importante activité de l'eau (aw). Cette dernière provoque et accélère l'oxydation des lipides par la diffusion des catalyseurs métalliques vers les sites d'oxydation.

I.6.2.6. Indice de saponification

L'indice de saponification, représente la quantité en milligrammes de KOH (potasse) nécessaire pour transformer en savon les acides gras libres et les glycérides contenues dans un gramme de corps gras(Diakite et al., 2022).

I.6.2.7. La teneur en savon

Les traces de savon expriment la teneur en oléate de sodium dans l'huile. Cette teneur renseigne sur l'efficacité des séparateurs(Diakite et al., 2022).

I.6.2.8. La teneur en matières insaponifiables

On entend par matières insaponifiables d'un corps gras, l'ensemble des produits présents dans ce corps gras, qui, après saponification de celui-ci par l'hydroxyde alcalin, extraction par un solvant spécifié et élimination de ce dernier, restent non volatils dans les conditions opératoires bien définies(Diakite et al., 2022).

I.6.2.9. Le gossypol

Le gossypol est un polyphénol contenu en abondance dans les glandes microscopiques des graines de certains cotonniers du genre gossypium. C'est un pigment jaune, toxique, il assure une fonction défensive contre les insectes et les animaux herbivores (Diakite et al., 2022).

Il agit comme un agent de défense, mais peut causer des problèmes de fertilité et des toxicités (hépatiques, cardiaques) chez l'homme et les animaux non-ruminants.

I.6.2.10.Indice de réfraction

L'indice de réfraction (Ir) est le rapport entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction d'un rayon lumineux de longueur d'onde déterminée passant de l'air dans l'huile maintenue à température constante(Diakite et al., 2022). Il augmente avec le degré d'insaturation, d'oxydation et de la pureté. En effet, plus il y a de doubles liaisons acides gras insaturés, plus l'huile s'oxyde, plus l'indice de réfraction augmente. Si on mélange deux huiles, l'indice de réfraction change et hors norme et l'huile perd sa pureté.

I.7.2.11. Les caroténoïdes totaux

Les caroténoïdes totaux dans les huiles, notamment le carotène, sont des pigments antioxydants liposolubles essentiels, présents en fortes concentrations dans l'huile de palme (jusqu'à 25% dans les concentrés), l'huile de carotte et d'urucum. Ils marquent la qualité, la couleur et la valeur nutritionnelle (antioxydants, précurseurs de vitamine A). Le bêta-carotène est une molécule de la famille des caroténoïdes, que l'on retrouve dans les fruits et légumes orangés, mais aussi dans certaines huiles végétales. Dans l'organisme, il est converti en vitamine A, un nutriment clé pour la santé de la peau.

Son rôle antioxydant naturel aide à neutraliser les radicaux libres générés par l'exposition au soleil, réduisant ainsi les risques de vieillissement prématuré, de tâches pigmentaires et d'inflammation cutanée. En renforçant la barrière cutanée, le bêta-carotène prépare la peau à mieux supporter les agressions extérieures.

I.6.2.12. Les impuretés insolubles

Les matières insolubles dans les huiles sont des impuretés solides ou semi-solides (mécaniques, minérales, mucilages, savons, résines, résidus d'oxydation) qui ne se dissolvent pas dans le corps gras.

Elles sont déterminées par des normes internationales (ex: ISO 663) via filtration après dissolution de l'huile dans un solvant organique, la teneur étant généralement très faible.

I.6.2.13. La teneur en cuivre et fer

La teneur en cuivre (Cu) et en fer (Fe) dans les huiles végétales est un paramètre critique de qualité et de stabilité car ces métaux agissent comme des catalyseurs d'oxydation, favorisant le rancissement.

I.6.2.14. Teneur en matières volatiles

Les composés volatils sont responsables de l'arôme des huiles d'olive vierges, et en particulier des attributs positifs ou des défauts sensoriels.

I.6.2.15. Le profil lipidique

L'analyse du profil lipidique vise à déterminer la composition en acides gras des huiles. Ainsi, 3 types d'acides gras font partie du contrôle de la qualité des produits alimentaires huileux. Les acides gras insaturés sont à privilégier pour la santé du cœur. Les gras monoinsaturés (acide oléique) se retrouvent entre autres dans l'huile d'olive, l'avocat et les noix. Les gras polyinsaturés incluent les acides gras oméga-6(acide alpha linolénique, acide eicosapentaénoïque et acide docosahexaénoïque) et acide linolénique,acide arachidonique). Chez les omega -3, la première double liaison est sur le troisième carbone en partant du bout CH3 tandis que chez les Omega-6, elle est sur le sixième carbone en partout aussi du bout CH3.

I.6.2.15.1. Acides gras saturés

Les acides gras saturés sont caractérisés par l'absence de double liaison dans leur chaîne carbonée. Dans l'huile de palme raffinée, les acides gras saturés les plus abondants sont généralement l'acide palmitique (C16:0), l'acide stéarique (C18:0) et l'acide myristique (C14:0). Ces acides gras contribuent aux propriétés physiques et à la stabilité oxydative de l'huile(Gunstone, 2011).

I.6.2.15.2. Acides gras insaturés

Les acides gras insaturés possèdent une ou plusieurs doubles liaisons dans leur structure moléculaire. Dans l'huile de palme, les principaux acides gras insaturés sont l'acide oléique (C18:1), qui est un acide gras mono-insaturé, et l'acide linoléique (C18:2), qui est un acide gras polyinsaturé. Ces composés jouent un rôle important dans les propriétés nutritionnelles et fonctionnelles des huiles végétales(Gunstone, 2011).

I.6.2.15.3. Acides gras trans

Les acides gras trans, contrairement aux acides gars cis (les deux atomes d'hydrogènes sont du même côté de la double liaison), sont des isomères géométriques des acides gras insaturés dont la double liaison présente une configuration trans (les deux atomes d'hydrogènes sont en côtés opposées de la double liaison.

Ils peuvent apparaître lors de certains procédés technologiques impliquant des températures élevées comme la friture ou des réactions d'isomérisation. La détermination de leur teneur est importante en raison de leurs implications potentielles sur la santé humaine et la qualité nutritionnelle des huiles (Mozaffarian et al., 2006).

Les gras trans issus des huiles hydrogénées peuvent se retrouver dans certains produits transformés comme des margarines et des pâtisseries. Les acides gras trans présents dans les aliments proviennent de trois origines principales(AFSSA, 2005) :

- la biohydrogénation ruminale et différentes réactions enzymatiques annexes, responsables de la présence d'acides gras trans dans le lait et les denrées alimentaires issues des ruminants (viande, produits d'origine laitière) ;
- l'hydrogénation catalytique partielle d'huiles ou de graisses, responsable de la présence d'AG *trans* dans les huiles partiellement hydrogénées et les ≪ shortenings ≫ (margarines et mélanges de matières grasses anhydre destinés principalement à l'industrie),
- les traitements thermiques**,** sont responsables de la formation d'AG *trans* dans les huiles, les graisses et tout aliment contenant des corps gras. Ils peuvent être d'origine technologique ou domestique.

La consommation d'acides gras trans produits industriellement est associée à un risque accru de diabète, de maladies cardiovasculaires et d'obésité et environ 540 000 décès survenus chaque année sont imputables à des acides gras trans produits industriellement(OMS, 2021).

I.6.2.16. Indice d'ester

L'indice d'ester est la masse d'hydroxyde de potassium (KOH) en milligrammes nécessaire pour saponifier les esters présents dans de matière grasse, calculé comme la différence entre l'indice de saponification et l'indice d'acide. Il mesure la quantité d'esters (glycérides) présents, permettant de déterminer la masse molaire des triglycérides, d'évaluer la qualité et d'identifier la pureté des huiles.

I.6.2.17.P-anisidine

Quantifie les sous-produits de l'oxydation, tels que les composés carbonylés de haut poids moléculaire. Une huile oxydée et désodorisée serait détectée par cette analyse.

I.6.2.18. Totox (oxydation totale)

Il combine l'indice de peroxyde et l'indice pour une évaluation complète de l'oxydation des huiles.

I.6.2.19.TBA

C'est le test à l'acide thiobarbiturique qui réagit avec les aldéhydes tels que l'acide malonique. Une coloration rouge se forme, elle est mesurée par spectrophotométrie.

I.6.2.20. La viscosité

La viscosité est définie comme étant le coefficient de frottement intramoléculaire. C'est la mesure du temps que nécessite une bille en métal pour s'écouler dans un capillaire d'un viscosimètre rempli d'huile. L'altération thermo-oxydative se traduit par l'augmentation de la viscosité des corps gras; de ce fait, la mesure de la viscosité pourrait être un bon test pour apprécier l'état d'altération d'une huile(Laceb & Louerguioui, 2022).

I.6.2.21. Le test rancimat

Le test Rancimat, également appelé indice de stabilité oxydative (OSI pour Oxidation Stability Index), est une méthode de vieillissement accéléré conçue pour mesurer la résistance des graisses et huiles à l'oxydation. Ce test permet donc d'estimer de manière fiable la stabilité oxydative d'un produit, et donc sa durée de conservation.

I.6.2.22. Taux des composes polaires

Selon Roman(2013) et Benhamou (2017), le dosage des composés polaires est un indicateur de la qualité des huiles de friture ; il donne des informations sur la teneur globale en composés néoformés ; ces derniers ont une polarité plus élevée que celle des triglycérides des huiles à l'état frais. La réglementation actuelle limite leur taux à 25%. La dénomination CPT concerne tous les produits formés lors du chauffage d'un corps gras.

D'un point de vue chimique, les CPT regroupent les acides gras libres, les mono et diglycérides, les dimères et trimères de triglycérides (appelés polymères de triglycérides), ainsi que d'autres substances polaires oxydées (acides gras oxydés, triglycérides oxydés, etc.).

Tableau 4 : Normes de qualité des paramètres physicochimiques des huiles alimentaires

Paramètres d'évaluation de la qualité des huiles	Normes (Codex Alimentarius, 2009)
Densité	Densité relative (40°C/eau â. 20°C) :0,899-0.902
	Densité apparente (à 40°C) : 0,899-0,902
Indice de peroxyde	Huiles raffinées jusqu'à 10 milliéquivalents d'oxygène actif/kg d'huile
	Huiles vierges et huiles pressées à froid jusqu'à 15 milliéquivalents d'oxygène actif/kg d'huile
Indice d'acide	Huiles raffinées: ≤ 0,6 mg KOH/g d'huile
	Huiles obtenues par pression à froid et huiles vierges : ≤ 4,0 mg KOH/g d'huile
	Huiles de palme vierges: ≤ 10,0 mg KOH/g d'huile
Indice d''iode	99-119
Humidité ou Teneur en eau	≤ 0.2 m/m
Indice de saponification	189-198
la teneur en savon	≤ 0.005 m/m
La teneur en matières insaponifiables	≤ 15
Gossypol	Négatif
Indice de réfraction	1, 4586-1, 4592
Les caroténoïdes totaux	500-1200mg/kg
Les impuretés insolubles	≤ 0.05%
La teneur en cuivre	Huiles raffinées : ≤ 0,1 mg/kg
	Huiles vierges : ≤ 0,4 mg/kg
Teneur en Fer	Huiles raffinées : ≤ 1,5 mg/kg
	Huiles vierges : ≤ 5,0 mg/kg
	Stéarine de palme brute : ≤ 5,0 mg/kg
	Oléine de palme brute : ≤ 7,0 mg/kg
Teneur en matières volatiles	≤ 0,2 % m/m
Profil lipidique	Les normes dépendent du type d'huiles :
	1. Huiles d'olive : AGS : 12-20, AGMI : 55-83, AGPI : 3-21
	2. Huiles de tourne-sol : AGS : 8-14, AGMI : 14-40, AGPI : 48-74
	3. Huiles de palme : AGS : 44-50, AGMI : 37-45, AGPI : 8-12
	AGT (Aides gras trans) :≤ 2 g d'AGT pour 100 g de matières grasses (soit 2 %)
Indice d'ester	Dépend du type d'huile
p-Anisidine	≤ 10 (huile vierge)
	≤ 20 (huile raffinée)
Oxydation totale (TotOx)	valeur idéale < 10, dégradée > 26)
Test TBARS (TBA)	≤ 1–2 mg/kg
Viscosité	Variable selon l'huile
Test Rancimat (stabilité oxydative)	≤ 6 h (huiles vierges)
Taux des composés polaires	≤ 25%

AGS: acides gras saturés, AGMI : acides gras monoinsaturés,AGPI : acides gras polyinsaturés,AGT : acides gras trans

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

I1.1. Lieu d'étude

L'étude a été menée dans la ville de Bujumbura, située à l'ouest du Burundi. L'échantillonnage des huiles utilisées pour la friture des beignets a été réalisé dans les communes de Ntahangwa, Mukaza et Mugere, constituant les trois communes urbaines de la ville de Bujumbura. Dans chaque commune, 3 quartiers ont été ciblé aléatoirement soit 9 quartiers au total (tableau 5).

Tableau 5: Lieux d'échantillonnage

Communes	Quartiers visités
Ntahangwa	Kamenge
	Ngagara
	Gasenyi
Mukaza	Nyakabiga
	Jabe-Bwiza
	Buyenzi
Mugere	Musaga
	Busoro
	Kanyosha

Les échantillons ont été collectés auprès de petits points artisanaux de production de beignets, installés principalement sur le long de certains axes routiers et dans les ménages Ces points de production se caractérisent par une activité informelle de transformation alimentaire et par l'utilisation répétée des huiles de friture, susceptibles d'altération physico-chimique.

II.2. Taille de l'échantillon

La taille de l'échantillon retenue dans chaque commune pour cette étude est de 30 échantillons d'huile de friture, collectés auprès de différents points artisanaux de production de beignets situés dans les 9 quartiers des trois communes urbaines de la ville de Bujumbura.

En effet, une taille dont $n \geq 30$ échantillons permet d'obtenir une approximation normale de la distribution de la moyenne, d'assurer la validité des tests statistiques paramétriques(moyenne et écart type) et de garantir des estimations fiables tout en respectant un compromis méthodologique et pratique reconnu dans la recherche scientifique (Illowsky & Dean, 2013). Dans chaque quartier, il a été collecté 10 échantillons d'huiles utilisées dans la friture correspondant ainsi à 10 producteurs de beignets, chaque ayant fourni un seul échantillon.

II.3. Matériel et protocole d'analyse des paramètres étudiés

Dans une étude portant sur l'évaluation de la qualité des huiles utilisées dans la préparation des produits frits comme les beignets, plusieurs paramètres physico-chimiques et compositionnels peuvent être analysés afin d'apprécier leur stabilité et leur composition lipidique. Au cours de la présente étude, les paramètres analysés comprennent l'indice de peroxyde, l'indice d'acidité ainsi que le profil en acides gras.



Figure 4: Echantillons étudiés d'huiles de palme raffinées et les beignets

II. 3.1. Indice de peroxyde

L'indice de peroxyde est une mesure du nombre total des peroxydes dans l'huile, exprimée en milliéquivalent de O2*kg-1 d'huile (mEq O2 / kg d'huile). La méthode de détermination d'IP est la méthode officielle de l'UE basée sur le titrage de l'iode libéré de l'iodure de potassium par les peroxydes présents dans l'huile. En d'autres termes, la valeur de peroxyde est une mesure de l'oxygène actif présent dans les chaines organiques du corps gras sous forme d'époxyde ou d'hydro peroxyde.

Plus la valeur est élevée, plus la dégradation est due à l'oxydation. L'indice de peroxyde augmente habituellement de façon graduelle au fil du temps pour atteindre un pic puis diminue avec l'état d'oxydation avancée (Benachenhou, 2013).

Le taux de peroxydes d'une huile dépend de plusieurs paramètres, notamment les conditions de récolte, le type de raffinage adopté, les conditions de stockage et de commercialisation de l'huile , exposition à l'air et la lumière , la nature des AG constitutifs (plus une huile est riche en AGI, plus elle devient sensible à l'oxydation) ainsi que les conditions inadéquates de cuisson telles que le chauffage prolongée et la réutilisation des huiles de friture (Ait & Azzoune ,2019).

En effet, l'indice de peroxyde est un paramètre important pour évaluer la qualité des graisses et des huiles comestibles et est utilisé dans le cadre de l'oxydation lipidique pour évaluer le degré d'oxydation primaire des matières grasses (Diakite et al., 2022).

Il fournit des informations quantitatives sur la présence de peroxydes ou d'hydroperoxydes ,produits primaires de l'oxydation lipidique qui se forment lorsque les acides gras insaturés des graisses et des huiles réagissent avec l'oxygène (Kamara, 2025).

Il mesure la concentration des peroxydes et hydroperoxydes formés au cours des premières étapes de l'oxydation des acides gras. Une augmentation de cet indice traduit généralement le début du processus de rancissement oxydatif et une altération de la qualité de l'huile. L'indice de peroxyde est généralement exprimé en milléquivalents d'oxygène actif par kilogramme d'huile (meq O_2/kg).

L'indice de peroxyde est le nombre de milliéquivalents d'oxygène actif par kilogramme de corps gras oxydant l'iodure de potassium avec libération d'iode. Le principe de cette méthode consiste à un traitement d'une quantité d'huile en solution dans l'acide acétique et le chloroforme, par une solution d'iodure de potassium (KI).

Le titrage d'iode libéré se fait par une solution de thiosulfate de sodium ($Na_2S_2O_3$) à 0.01 N en présence d'empois d'amidon comme indicateur coloré selon la réaction suivante :

$$I_2 + 2\,Na_2S_2O_3 \longrightarrow 2\,NaI + Na_2S_4O_6$$

II.3.1.1. Matériel et réactifs

Tableau 6 : Matériel et réactifs utilisés dans l'analyse de l'indice de peroxyde

Matériels	**Réactifs**
• Echantillon : Huile de palme raffinée utilisée dans la friture des beignets • Bêchers • Eprouvette graduées • Balance analytique • Agitateur magnétique • Fiole Jaugé • Erlenmeyer de 250ml • Burettes + montage de titrage • Téflons • Leve-téflons	• Chloroforme • Acide acétique • Iodure de potassiums • Eau distillée • Thiosulfate de sodium • Empois d'amidon



Figure 5: Quelques matériels utilisés (a. béchers, 2. Agitateurs magnétiques, 3. Balance analytique, 4. Téflons et lève-téflons et équipement de titrage)

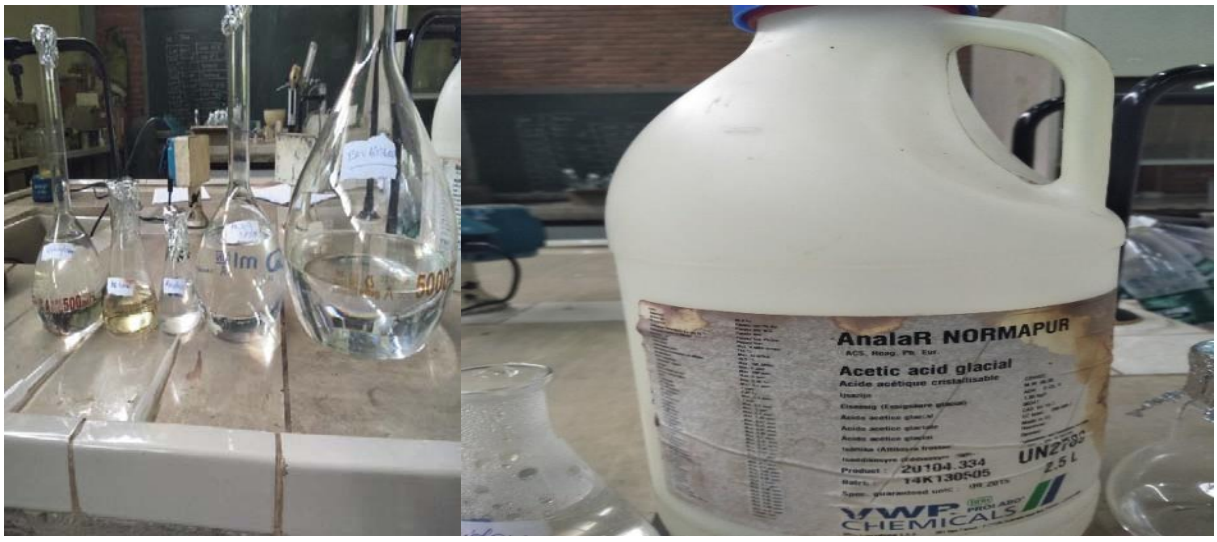


Figure 6: Réactifs utilisés (chloroforme, iodure de potassium, empois d'amidon, thiosulfate de sodium et acide acétique)

II.3. 1.2. Protocole d'analyse (ISO3960 :2017/A1 :2020)

- Peser plus ou moins 1g d'échantillon
- Ajouter 30ml du mélange chloroforme : acide acétique (3 :2 en volume) donc 18 ml de chloroforme et 12 ml d'acide acétique
- Agiter jusqu'à dissolution complète.
- Ajouter 0,5 mL de solution saturée de KI.
- Boucher immédiatement le flacon et agiter pendant 1 minute.
- Laisser réagir exactement 1 minute à l'abri de la lumière.
- Ajouter 30 mL d'eau distillée.
- Titrer immédiatement avec la solution de $Na_2S_2O_3$ 0,01.
- Lorsque la solution devient jaune pâle, ajouter 0,5 mL d'indicateur d'amidon.
- Continuer le titrage jusqu'à disparition complète de la coloration bleue

N.B : Effectuer de la même façon un essai à blanc à l'exception du corps gras.

L'indice de peroxyde est calculé grâce à la formule suivante :

$$IP = \frac{(V1-V2)*N}{m} * 1000$$

Avec :

- IP : Indice de peroxyde (méq O_2/kg)
- V_1 : le volume de thiosulfate 0,01N utilisé pour titrer l'échantillon
- V_2 : le volume de thiosulfate 0,01N utilisé pour titrer le blanc.
- m : la masse de l'échantillon en g.
- N : la concentration de la solution titrante de thiosulfate de sodium.



Figure 7 : La pesée de l'échantillon, processus de titrage, apparence de l'échantillon pendant l'homogénéisation sur l'agitateur magnétique, avant et après le point d'équivalence

III.3. 2. Indice d'acidité

L'indice d'acidité permet d'évaluer la quantité d'acides gras libres présents dans une huile. Il reflète le degré d'hydrolyse des triglycérides, phénomène pouvant se produire lors du stockage, de la manipulation ou de la transformation industrielle des huiles.

Cet indice est exprimé en milligrammes d'hydroxyde de potassium (mg KOH) nécessaires pour neutraliser les acides gras libres contenus dans un gramme d'huile. Une valeur élevée indique généralement une dégradation de la qualité de l'huile (Gunstone, 2011).

Le degré d'acidification de l'huile est souvent employé par plusieurs termes : indice d'acide, acidité, teneur en AGL, etc. Cet indice d'acidité ou AGL représente le nombre de milligrammes d'hydroxyde de potassium nécessaires pour neutraliser les AGL présents dans 1 g de corps gras ; il s'exprime en mg de KOH.g-1. La quantité des acides gras libres est une mesure de la qualité de l'huile, et reflète le soin apporté à la réalisation des processus de stockage de l'huile (Benachenhou, 2013).

L'hydrolyse de huiles dont dépend la teneur en acides gras libre influence la valeur de l'indice d'acidité correspond à la rupture des liaisons ester des triglycérides sous l'action de l'eau, conduisant à la formation d'acides gras libres, diglycérides (diacylglycérols) et de monoglycérides (monoacylglycérols), résultant de l'hydrolyse partielle des triglycérides ,qui, à leur tour, peuvent être hydrolysés pour donner davantage d'acides gras libres et finalement, du glycérol (Gunstone, 2004). Cette réaction est favorisée par l'humidité ou les conditions de stockage inadéquates et la chaleur, en particulier lors de la friture.

II.3.2.1. Matériel et réactifs

Tableau 7 : Matériel et réactifs utilisés dans l'analyse de l'indice d'acide

Matériels	**Réactifs**
• Echantillon : Huile de palme raffinée utilisée dans la friture des beignets • Balance analytique • Agitateur magnétique • Burette et pipette graduée • Becher ou erlenmeyer • Baron aimanté (téflon) • Plaque chauffante	• Hydroxyde de potassium 0.5 N • Ethanol • Solution de phénolphtaléine



Figure 8: Quelques matériels utilisés (1. Balance analytique, 2. Agitateur magnétique, 3. Étuve pour le séchage des béchers, 4.plaque chauffante, 5. Béchers)



Figure 9 : Produits utilisés (phénolphtaléine brute, 2. Ethanol, 3. Hydroxyde de potassium 4. Solution de phénolphtaléine utilisée comme indicateur coloré)

II.3.2.2. Protocole (ISO 660 :2020)

L'indice d'acidité est déterminé par la méthode volumétrique qui consiste à mesurer l'acidité titrable avec une solution d'hydroxyde de potassium (KOH 0,1 N) alcoolisé en présence d'un indicateur de fin de réaction (phénolphtaléine) (Kouadio, 2022).

Procédure :

- Peser 1,0 et 2,0 g d'échantillon et mets-le dans un bécher ou erlenmeyer
- Ajouter 20 ml d'éthanol et quelques gouttes de phénolphtaléine
- Chauffer le mélange tout en agitant jusqu'à l'ébullition pendant au moins 1 heure
- Titrer la solution avec l'hydroxyde de potassium 0.5N jusqu'à l'apparition d'une coloration rose persistante.

Expression des résultats **:** $IA=\frac{Mm\ KOH*N\ KOH*V\ KOH}{m}$

Avec :

- IA: Indice d'acide (mg KOH/g)
- M: masse de l'échantillon(g)
- Mm KOH : Masse molaire de l'hydroxyde de potassium utilisé pour titrage
- V KOH : Volume de l'hydroxyde de potassium utilisé pour titrage
- N : Concentration de l'hydroxyde de potassium utilisé pour titrage (0.5N).

II.3. 3. Profil lipidique

La détermination du profil lipidique est généralement effectuée par chromatographie en phase gazeuse (GC) après transformation des acides gras en esters méthyliques d'acides gras (FAME). Cette technique permet l'identification et la quantification des différents acides gras présents dans l'huile(Gunstone et al., 2007)

Ainsi, les esters méthyliques d'acides gras ont été préparés à partir des huiles raffinées de palme utilisées dans la friture des beignets, puis analysés par chromatographie en phase gazeuse sur colonne capillaire. Les acides gras sont en principe identifiés en fonction de leurs temps de rétention à l'aide des standards (étalons). Leur taux est déterminé par le rapport entre l'aire des pics correspondants et la sommation des aires des pics de tous les acides gras.

Les esters méthyliques d'acides gras (FAME) ont été préparés selon une méthode dérivée de la norme ISO 12966-2:2017**,** basée sur une estérification acide suivie d'une transestérification alcaline, puis analysés par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme (GC-FID) conformément à ISO 12966-4:2026.

Catalyseur : acide fort/base forte

Triglycérides + méthanol $\Longrightarrow$ méthyl esters d'acides gras (FAMEs) + glycérol

II.3.3.1. Matériel et réactifs

Tableau 8 : **Matériel et réactifs utilisés dans l'analyse des acides gras**

Matériel	**Réactifs**
• **Chromatographie en phase gazeruze(GC)** • **Bêchers** • **Vials** • **Plaque chauffante**	• NaOH • H2SO4 conc ou Hcl conc • Méthanol • Hexane • Eau distillée



Figure 10 : Matériel utilisé (1 & 2 : GC ; 3,4 & 5 : Paramétrage du GC, chargement du Vial & observation du séquençage d'acides gras)



Figure 11 : Produits utilisés (De gauche à droite : acide sulfurique, hydroxyde de sodium, méthanol, hexane et sulfate de sodium anhydre)

II.3.3.2. Protocole (ISO12966-2:2017)

Etape 1 : Préparation des solvants d'estérification

1. Préparation du H2SO4 méthanolique (2% v/v) :

- Dans un ballon de 100 ml, ajouter 2 ml de H_2SO_4 et compléter avec du méthanol jusqu'au trait.

2. Préparation du méthoxide de sodium :

- Dissoudre 0.5 g de NaOH dans 100 mL methanol

Etape 2: Estérification acide

1. Peser 100 mg d'huile de palme dans un vial avec bouchon vissé.

2. Ajouter 2 ml de H_2SO_4 méthanolique.
3. Fermer partiellement le vial (ne pas le rendre complètement hermétique).
4. Chauffer à 60 °C pendant 60 minutes avec agitation douce.
5. Laisser refroidir à température ambiante.

Etape 3 : Transestérification alcaline

- Ajouter 2 ml de méthoxide de sodium dans le même vial
- Agiter vigoureusement ou vortexer pour homogénéiser
- Chauffer à 60 °C pendant 15 minutes
- Laisser refroidir à température ambiante

Etape 4 : Extraction des esters méthyliques d'acides gras

1. Ajouter 2 ml d'hexane
2. Ajouter 2 ml d'eau distillée
3. Secouer soigneusement le vial
4. Laisser décanter pour séparer les phases:
   - Portion supérieure : hexane + Esters méthyliques
   - Portion inférieure : méthanol + eau+ glycérol + sels

Etape 5: Clarification avec le sulfate de sodium anhydre (Na_2SO_4)

- Laisser le mélanger reposer pendant 15 min pour que l'hexane s'évapore de la couche supérieure ;
- Transférer soigneusement la couche supérieure conténant les esters méthyliques dans un vial pour GC,
- Si la phase n'est pas claire, ajouter de l'eau distillée et répéter le processus de clarification.

Etape 6: Analyse au GC FID (ISO 12966-4:2026)

Paramètre	**Valeur recommandée**
Détecteur	FID
Volume d'injection	1 µL
Mode d'injection	Split ou splitless
Solvant	Hexane ou iso-octane
Gaz vecteur	Hélium ou hydrogène
Colonne	Capillaire polaire (cyanopropyl-polysiloxane, par exemple CP-Sil 88 ou équivalent)
Température de l'injecteur	250–260 °C
Température du détecteur	260–280 °C

II.4. L'encodage et traitement des données

Les données ont été encodées dans le logiciel Excel. Quant au calcul des moyennes, les écarts types et l'analyse de la variance, le logiciel SPSS a été utilisé.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III. 1. Indice de peroxyde(IP)

Les résultats du tableau 9 montrent que les huiles ayant fait objet de cette étude sont globalement hyperperoxydés (IP= 36.47±24.40). En effet, dans tous quartiers et donc dans toutes les communes, le niveau moyen de peroxyde dépasse largement 10 méq O2/Kg de matières grasses, un seuil de l'IP selon les standards du Codex Alimentarius (2009) pour les huiles alimentaires afin d'assurer la santé des consommateurs. Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée pour comparer les moyennes entre les groupes. Ainsi, en plus de la comparaison des résultats moyens de peroxydes à l'échelle communale, une comparaison a également été effectuée au sein de chaque commune, en analysant les indices moyens de peroxydes des différents quartiers.

Il ressort de ces résultats qu'en commune Ntahangwa, les niveaux moyens de peroxydation des huiles collectées dans les quartiers Kamenge (IP= 49.02±21.12), Gasenyi (IP= 26.08±21.84) et Ngagara (IP= 33.89±26.91) sont statiquement égaux. Il n'y a pas donc une différence significative (P>0.05) entre les valeurs moyennes de l'IP.

Par contre, au sein des autres communes, une différence hautement significative a été observée entre certains quartiers. Dans la commune Mukaza, les niveaux de peroxydation des huiles collectées dans le quartier Nyakabiga (IP= 52.99±21.09) différèrent significativement (P<0.05) de celles collectées dans les quartiers Jabe-Bwiza (IP= 26.02±21.45) avec une forte peroxydation dans le quartier Nyakabiga tandis que le niveau de peroxydation du quartier Buyenzi (IP= 31.48±28.52) n'est pas significativement différent (P>0.05) du quartier Nyakabiga ni de Jabe-Bwiza.

Dans la commune Mugere, les échantillons du quartier Musaga (IP= 51.42±20.19) ont révélé une peroxydation élevée et celle-ci diffère significativement (P<0.05) de celle de Busoro (IP= 27.51±22.71). En revanche, les résultats obtenus à Kanyosha (IP= 32.12±26.86) ont été non significativement différents (P>0.05) à ceux de Musaga et Busoro.

Les résultats des communes Ntahangwa (IP= 36.33±24.60), Mukaza (IP= 36.83±25.95) et Mugere (IP= 37.01±24.93) soumis au test ANOVA ont montré que ceux-ci sont significativement égaux (P>0.05).

Résultats d'analyse de la variance d'indices de peroxyde des échantillons de tous quartiers explorés (Tableau 10**)** se répartissent en deux groupes.

En effet, les huiles fortement peroxydées ont été échantillonnées dans les quartiers Nyakabiga (IP= 52.99±21.09) et Musaga (IP= 51.42±20.19) et leur peroxydation diffère significativement (P<0.05) de celles de Gasenyi (IP= 26.08±21.84),Jabe-Bwiza(IP= 26.02±21.45) et Busoro(IP= 27.51±22.71).

Cependant, les résultats de Kamenge (IP= 49.02±21.12), Ngagara (IP= 33.89±26.91), Buyenzi (IP= 31.48±28.52) et Kanyosha IP= (32.12±26.86) ont montré que ceux-ci ne diffèrent pas significativement (P>0.05) des autres quartiers.

Tableau 9 : Résultats d'indice de peroxyde au niveau des quartiers et leur commune respective ainsi que la moyenne générale

Communes	Quartiers	IP(méq O2/Kg)	Moyenne générale
Ntahangwa	Kamenge	49.02±21.12[a]	36.47±24.40
	Gasenyi	26.08±21.84[a]	
	Ngagara	33.89±26.91[a]	
	36.33±24.60[a]		
Mukaza	Nyakabiga	52.99±21.09[a]	
	Jabe-Bwiza	26.02±21.45[b]	
	Buyenzi	31.48±28.52[ab]	
	36.83±25.95[a]		
Mugere	Musaga	51.42±20.19[a]	
	Busoro	27.5122.71[b]	
	Kanyosha	32.12±26.86[ab]	
	37.01±24.93[a]		
Normes du Codex Alimentarius (2019)	10		

Tableau 10 : Résultats d'analyse de la variance d'indices de peroxyde des échantillons des quartiers explorés

Quartiers	IP(méq O2/Kg)
Kamenge	49.02±21.12[ab]
Gasenyi	26.08±21.84[b]
Ngagara	33.89±26.91[ab]
Nyakabiga	52.99±21.09[a]
Jabe-Bwiza	26.02±21.45[b]
Buyenzi	31.48±28.52[ab]
Musaga	51.42±20.19[a]
Busoro	27.51±22.71[b]
Kanyosha	32.12±26.86[ab]

Les résultats de la présente étude sur l'indice de peroxyde diffèrent de ceux de Kamara (2025) réalisée sur les huiles raffinées de palme vendues sur les différents marchés de la ville de Bujumbura. En effet, pour cette étude, l'IP moyen oscille entre 26.02±21.45 et 52.99±21.09 tandis que pour lui, il oscillait entre 5, 3 ±2, 970 5, 8 ± 2, 263.

Cette différence paraît logique car cette étude portait sur les huiles raffinées déjà utilisées pendant la friture des beignets, un processus au cours lequel, les huiles fraichement achetées au marché auraient subi diverses formes de dégradation en l'occurrence l'oxydation thermique et hydrolyse qui accentue l'oxydation lipidique .Ainsi, les huiles alimentaires subissent une dégradation plus rapide en conditions réelles d'utilisation (cuisson, friture, stockage)(Choe, E., & Min, 2007).

Les résultats de cette étude corroborent avec ceux de Habonimana et al.(2024) dans la mesure où ils se trouvent dans la même marge (tous >10 méq O2/Kg). En effet, Habonimana et al. (2024) ont mené une étude expérimentale sur les huiles raffinées de palme utilisées dans la friture, avant la friture, après la première utilisation, après la troisième utilisation et sur les huiles extraites des beignets produits. Leurs résultats ont montré que les valeurs de l'IP respectaient les normes uniquement jusqu'à la première utilisation (10,24±1.35). Une tendance évolutive de l'IP a été observée au cours des autres étapes de la cuisson (friture) ce qui indique une altération continue de l'huile pendant la friture.

Selon leurs résultats, l'indice de peroxyde moyen de l'huile utilisée trois fois était de 15,70±1,31 44 tandis que celui de l'huile extraite des beignets était de 15,80±1,40 44, des valeurs significativement supérieurs au seuil.

Les résultats de cette étude montrent que les huiles collectées utilisées dans la friture des beignets auraient subies des utilisations répétitives et des surchauffes ou auraient été conservées dans de mauvaises conditions avant leur utilisation (milieux aérées et lumineux), l'IP moyen étant de loin supérieur à la valeur seuil.

Au regard de ces résultats, les consommateurs des beignets produits artisanalement dans la ville de Bujumbura seraient exposés aux divers risques de la consommation des produis peroxydés et hydoperoxydés et une éducation des bonnes pratiques de cuisson, d'utilisation et de stockage des huiles alimentaires s'avère nécessaire.

En effet, les peroxydes et les hydroperoxydes peuvent donner un goût de rance aux huiles car ils sont instables et peuvent se décomposer en composés secondaires responsables d'odeur de la rance notamment les aldéhydes et les cétones.

Les peroxydes et hydroperoxydes formés dans les huiles oxydées ne se contentent pas uniquement d'indiquer la rancidité des huiles, ils représentent également un risque potentiel pour la santé humaine, notamment par la médiation du stress oxydatif, de l'inflammation et de la progression des maladies cardiovasculaires.

Lors de l'oxydation des huiles alimentaires, les acides gras insaturés présents dans les lipides réagissent avec l'oxygène pour former des hydroperoxydes lipidiques (ROOH), qui sont les principaux produits primaires de l'oxydation lipidique.

Ces hydroperoxydes sont instables et peuvent se décomposer en radicaux libres, ainsi qu'en produits secondaires tels que les aldéhydes (malondialdéhyde, 4-hydroxy-2-nonénal), cétones et alcools et l'exposition chronique à ces composés peut contribuer à des états de stress oxydatif systémique, avec des implications possibles sur le vieillissement cellulaire et certaines maladies neurodégénératives (Miyazawa , 2021).

L'ingestion de ces produits d'oxydation lipidique a été associée à divers effets biologiques néfastes pour la santé humaine. Les hydroperoxydes et leurs produits secondaires sont capables de générer un stress oxydatif dans l'organisme, provoquant des dommages aux membranes cellulaires, aux protéines et à l'ADN (Leong, 2021).

Des études ont montré que l'ingestion des peroxydes et des hydroperoxydes peut avoir plusieurs effets néfastes sur la santé humaine, principalement par le biais du stress oxydatif et de l'inflammation car ces composés peuvent se décomposer en radicaux libres très réactifs, qui endommagent les membranes cellulaires, les protéines et l'ADN, entraînant la mort cellulaire ou des mutations.

Ils stimulent également la production de cytokines pro-inflammatoires, contribuant à l'inflammation chronique et aux maladies cardiovasculaires et métaboliques(Esterbauer et al. 1991).

Le même auteur signale également que les peroxydes peuvent interférer avec les enzymes du métabolisme lipidique, perturbant le métabolisme normal des lipides et du glucose, ce qui favorise l'insulinorésistance et le syndrome métabolique.

Certains hydroperoxydes et produits secondaires ont également montré, dans des études expérimentales, une activité mutagène faible et la capacité d'interférer avec la croissance de cellules cancéreuses, suggérant un potentiel rôle dans la carcinogenèse(Rohr-udilova et al., 2008).

Avec la décomposition de ces hydrodroperoxydes, l'indice de peroxyde peut diminuer, donnant l'impression que la matière grasse est peu oxydée, alors qu'elle est en réalité déjà altérée d'où il est nécessaire d'envisager d'autres paramètres analytiques complémentaires pour une évaluation complète de l'oxydation lipidique d'une huile tels que l'indice d'anisidine, le test TBARS (Substances Réactives à l'Acide Thiobarbiturique) et la chromatographie en phase gazeuse (GC) utilisées pour évaluer l'oxydation secondaire à travers la détection des aldéhydes et des cétones issus de la dégradation des hydroperoxydes (Gunstone, 2011).

III.2. Indice d'acide(IA)

L'analyse du tableau 11 montre que toutes les huiles collectées sont fortement acides. En effet, la moyenne générale de l'indice d'acide de tous les échantillons analysés est plus élevée (IA= 5.54±2.57) et aucun d'entre eux n'a révélé un indice d'acide qui respecte les standards du Codex Alimentarius (2009), les huiles alimentaires d'acidité acceptable n'excédant pas en principe IA= 0.6 mg KOH/g.

Le test ANOVA a été effectué pour comparer les moyennes sous différents angles. Il a été constaté que dans certaines communes, les indices d'acides moyens de leurs quartiers sont significativement (P>0.05) égaux. C'est le cas des quartiers Kamenge, Gasenyi et Ngagara de la commune Ntahangwa avec IA= 6.26±2.83, IA=5.69±2.47 et IA=4.57±1.91 respectivement et des quartiers Musaga, Busoro et Kanyosha de la commune Mugere avec IA=6.54±2.66, A=6.12±2.59 et IA=4.53±2.26 respectivement.

Quant à la commune Mukaza, les résultats de l'analyse de la variance ont montré que les huiles collectées dans le quartier Nyakabiga (IA=7.33±3.26) sont trop acides et leur moyenne est significativement différente (P<0.05) de celles des quartiers Jabe-Bwiza(IA=4.86±1.19) et Buyenzi(IA=4.59±2.33), les moyennes des indices d'acides des huiles collectées dans les quartiers de Jabe-Bwiza et Buyenzi étant statistiquement les mêmes (P>0.05). Le test ANOVA effectué pour comparer les moyennes des indices d'acides des communes Ntahangwa,Mukaza et Mugere a fait savoir qu'il n'existe pas une différence significative(P>0.05) entre celles-ci.

Le tableau 12 représente les résultats du test ANOVA appliqué aux données d'indices d'acides de tous les quartiers visités. Ces résultats montent que les huiles collectées dans les quartiers Ngagara (IA= 4.57±1.91), Buyenzi (IA=4.59±2.33) et Kanyosha (IA=4.53±2.26) sont significativement différentes (P<0.05) de celles de Nyakabiga (IA=7.33±3.26) du point de vue acidité et c'est à Nyakabiga que celles-ci sont trop acides. Cette analyse a également montré que les huiles des quartiers Kamenge (6.26±2.83), Gasenyi (5.69±2.47), Jabe-Bwiza (4.86±1.19), Musaga (6.54±2.66) et Busoro (6.12±2.59) ont une acidité qui ne diffère pas significativement (P>0.05) de celles des autres quartiers en terme d'acidité.

Tableau 11 : Résultats d'indice d'acidité au niveau des quartiers et leur commune respective ainsi que la moyenne générale

Communes	Quartiers	IA(mg KOH/g)	Moyenne générale
Ntahangwa	Kamenge	6.26±2.83[a]	5.54±2.57
	Gasenyi	5.69±2.47[a]	
	Ngagara	4.57±1.91[a]	
		5.50±2.49[a]	
Mukaza	Nyakabiga	7.33±3.26[a]	
	Jabe-Bwiza	4.86±1.19[b]	
	Buyenzi	4.59±2.33[b]	
		5.59±2.71[a]	
Mugere	Musaga	6.54±2.66[a]	
	Busoro	6.12±2.59[a]	
	Kanyosha	4.53±2.26[a]	
		5.74±2.63[a]	
Normes du Codex Alimentarius (2019)	0.6		

Tableau 12 : Résultats d'analyse de la variance d'indices d'acidité des échantillons des quartiers explorés

Quartiers	IA(mg KOH/g)
Kamenge	6.26 ± 2.83^{ab}
Gasenyi	5.69 ± 2.47^{ab}
Ngagara	4.57 ± 1.91^{b}
Nyakabiga	7.33 ± 3.26^{a}
Jabe-Bwiza	4.86 ± 1.19^{ab}
Buyenzi	4.59 ± 2.33^{b}
Musaga	6.54 ± 2.66^{ab}
Busoro	6.12 ± 2.59^{ab}
Kanyosha	4.53 ± 2.26^{b}

Les résultats de la présente étude sont proches de ceux de Kamara (2025). En effet, selon ses résultats, les huiles vendues dans les marchés de ville de Bujumbura sont fortement acides (il a trouvé un IA=4, 581±0, 5914 mgKOH/g pour les huiles de palme raffinée, une valeur proche de celles de la présente étude bien que cette étude portait sur les huiles déjà utilisées. Il a ainsi conclut que les huiles vendues dans les marchés de ville de Bujumbura sont fortement acides car leur acidité dépasse les normes (10mgKOH/g et 0.6 mgKOH/g respectivement pour les huiles de palme brutes et huiles de palme raffinées).

Les résultats de Habonimana et al. (2024) sont également proches de la présente étude et se trouvent dans la même marge de non-conformité. Ainsi, ils ont trouvé des indices d'acidité moyens de 5,3 ± 0,9 mg KOH/g pour l'huile fraiche (non encore utilisée), 7,2 ± 1,2 mg KOH/g pour l'huile ayant subi trois fritures et 8,0 ± 0,9 mg KOH/g pour l'huile extraite des beignets.

Il ressort des résultats de cette étude que les huiles de palme raffinées ayant fait objet d'étude auraient été réutilisées pendant la friture, seraient mal conservées et leur processus de raffinage aurait été inefficace par une neutralisation incomplète leur conférant une certaine teneur en acides gras libres. Cette étude montre que les beignets vendus dans la ville de Bujumbura et sur les zones périphériques fabriqués de manière artisanale sont trop acides et leur acidité dépasse globalement les normes du Codex Alimentarius (2019) et les consommateurs seraient exposés aux risques qui en découlent.

En effet, la consommation d'huiles à forte acidité peut entraîner des effets néfastes sur le système digestif. Ainsi , les acides gras libres en excès ont un caractère irritant pour la muqueuse gastrique, ce qui peut provoquer des troubles digestifs tels que des douleurs abdominales, des nausées ou des diarrhées (Choe & Min, 2006).

Les huiles présentant un indice d'acidité élevé ont une valeur nutritionnelle réduite car les acides gras essentiels peuvent être altérés et les vitamines liposolubles (A, D, E et K) sont partiellement détruites lors des processus de dégradation ce qui diminue ainsi leur intérêt nutritionnel et leur rôle protecteur dans l'organisme (FAO/WHO, 2010).

Le produit final de l'hydrolyse complète est le glycérol, la structure de base des triglycérides. Le glycérol libéré peut ensuite subir d'autres transformations notamment en conditions de forte température (comme en friture) où il peut se déshydrater pour former des composés toxiques tels que l'acroléine, une substance irritante et nocive(cancéreuse) pour la santé (Choe & Min, 2006).

III. 3. Profil lipidique

Les résultats d'analyse d'acides gras fournis par le GC repris dans la figure 12 (chromatogramme d'acides gras de l'échantillon témoin) et les figures 13, 14 et 15 (chromatogrammes d'huiles été utilisées dans la fabrication des beignets) montrent des différences significatives.

En effet, les pics correspondent aux acides gras et ceux-ci sont visibles et nombreux dans l'échantillon témoin (figure 12). En revanche, sur les figures 12, 13 et 14 les pics ont sensiblement régressé tandis que d'autres sont disparus. Ces régressions ou disparitions seraient dues à la détérioration des huiles, qui, lorsqu'elles sont encore saines, elles sont constituées de différents types d'acides gras mais lorsqu'elles sont déjà altérées, ceux-ci se transforment en radicaux libres puis en d'autres produits potentiellement toxiques.

En effet, les lipides alimentaires sont très sensibles aux facteurs environnementaux tels que l'exposition à la lumière, l'oxygène et aux températures élevées, qui favorisent la formation de radicaux libres et accélèrent l'oxydation des lipides, conduisant à un système alimentaire instable (Gharby et al., 2025).

Des études ont montré que sous l'action de la chaleur, de l'air et de la lumière, les radicaux libres et les autres composés toxiques se forment et ceux-ci provoquent un déséquilibre entre les agents oxydants et les systèmes de défense antioxydante de l'organisme (stress oxydatif) et endommagent les cellules, les protéines ainsi que l'ADN (Barry Halliwell et Gutteridge , 2015). A la longue, si un individu consomme ces produits, l'inflammation chronique se développe et le risque des maladies cardiovasculaires, de cancers et d'atteintes hépatiques ou rénales s'accélère (Kubow, 1990).

Il ressort de cette étude qu'en perdant qualitativement et quantitativement les acides gras (voire la régression et la disparition des pics), d'une part , la qualité nutritionnelle des huiles utilisées dans la friture des beignets est mise en cause car certains acides gras sont la source d'énergie, structurent les membranes cellulaires tandis que d'autres sont essentiels ,d'autre part, ces huiles exposent les consommateurs aux effets indésirables tels que le stress oxydatif, les dommages des membranes cellulaires, de protéines et d'ADN, le risque accru des maladies chroniques telles que les maladies cardiovasculaires et neurodégénératives, le cancer ,les atteintes hépatiques et rénales.

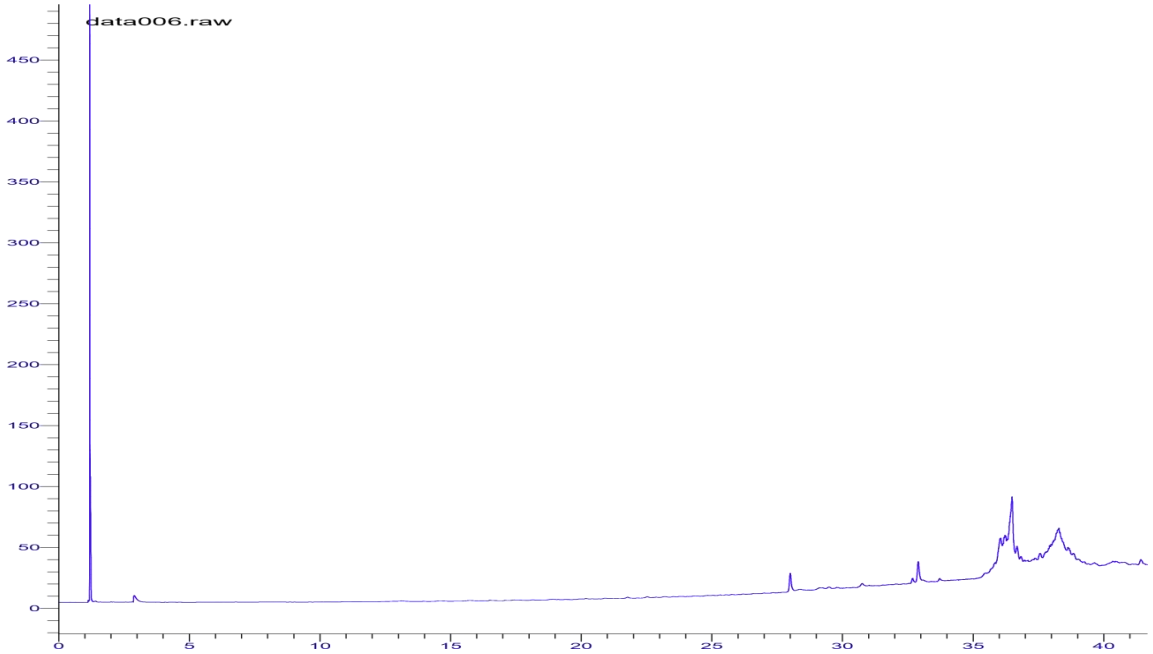


Figure 12 : Chromatogramme d'acides gras de l'échantillon témoin (huiles non encore utilisées)

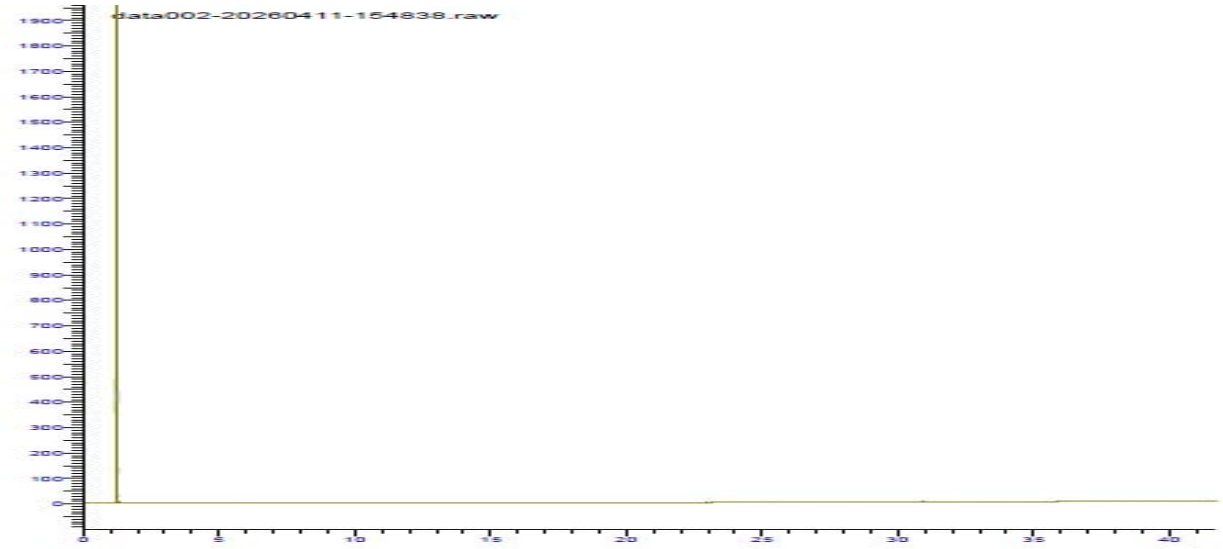


Figure 13: Chromatogramme d'acides gras d'huiles ayant été utilisées dans la fabrication des beignets(a)

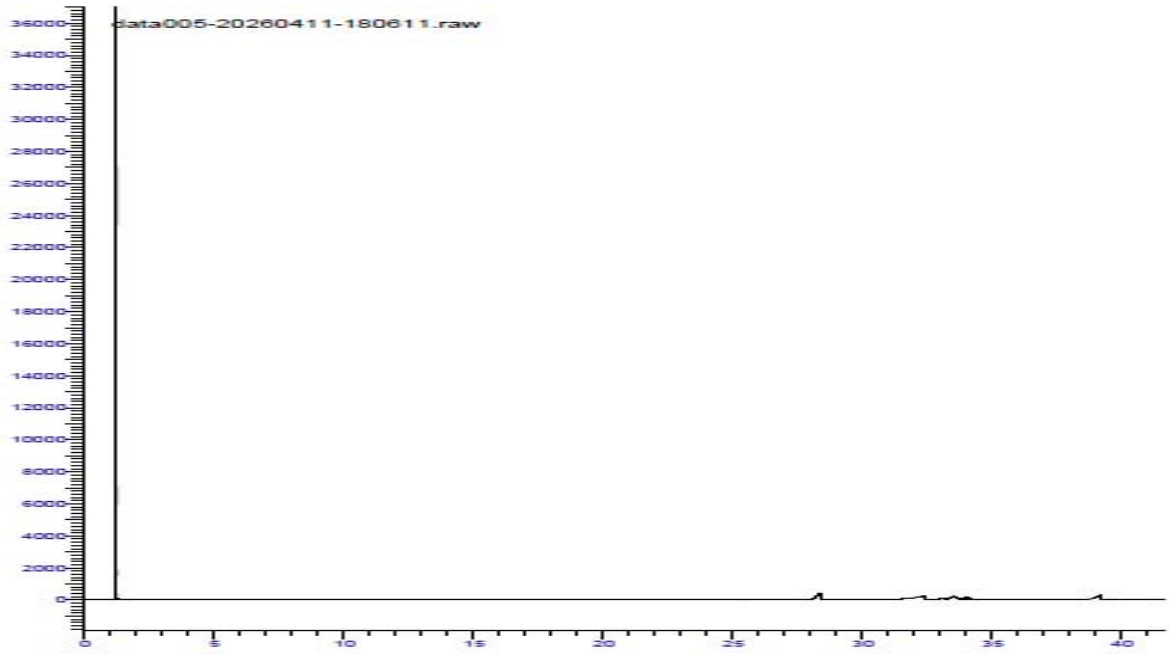


Figure 14 : Chromatogramme d'acides gras d'huiles ayant été utilisées dans la fabrication des beignets(b)

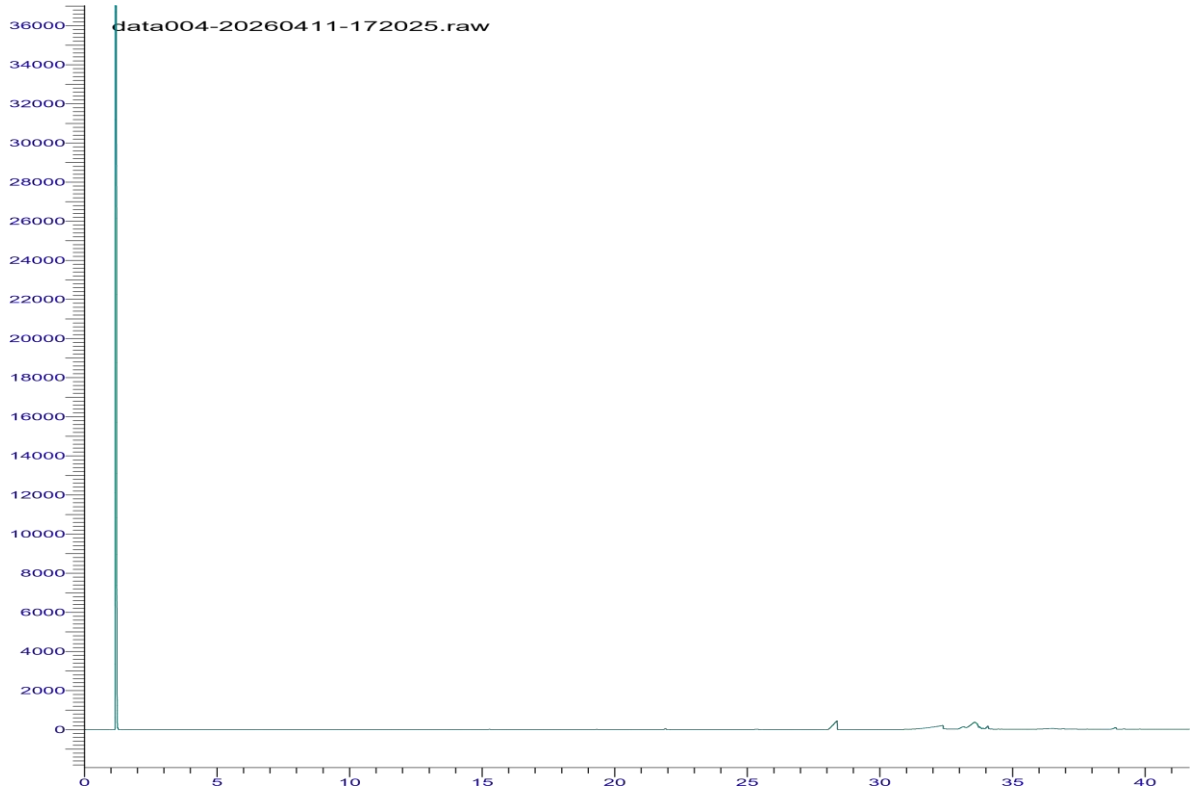


Figure 15 : Chromatogramme d'acides gras d'huiles ayant été utilisées dans la fabrication des beignets(c)

CONCLUSION

Au terme de ce travail portant sur l'étude de la peroxydation, l'acidité et le profil lipidique des huiles utilisées dans la friture des beignets ,des produits frits largement consommés au Burundi en particulier dans la ville de Bujumbura et sur les zones périphérique dans l'optique de contribuer à l'évaluation de la qualité, nous pouvons affirmer que nos objectifs ont été atteints.

Les résultats de cette étude ont montré que les beignets vendus et fabriqués artisanalement dans la ville de Bujumbura sont globalement hyperperoxydés (IP= 36.47±24.40 méq O2/Kg.) et sont hors normes (IP> 10 méq O2/Kg). Dans l'ensemble, le taux de peroxyde excède largement 10 méq O2/Kg de matières grasses, un seuil défini par l'IP conformément aux normes du Codex Alimentarius (2009) pour les huiles alimentaires dans le souci de protéger la santé des consommateurs. Les indices moyens de peroxyde ont été de 36.33±24.60 méq O2/Kg, 36.83±25.95 méq O2/Kg, et de 37.01±24.93 méq O2/Kg respectivement dans la commune Ntahangwa,Mukaza et Mugere, tous statistiquement équivalents ((P>0.05). Les résultats de cette étude révèlent que les consommateurs des beignets fabriqués artisanalement font face aux divers risques. En effet, les peroxydes et hydroperoxydes peuvent poser un danger pour la santé humaine, en particulier en provoquant le stress oxydatif, l'inflammation et l'augmentation des maladies cardiovasculaires. Les hydroperoxydes et leurs dérivés en générant un stress oxydatif au sein de l'organisme, ils peuvent aussi entrainer des dommages aux membranes cellulaires, aux protéines et à l'ADN.

Les peroxydes sont capables de perturber les enzymes impliquées dans le métabolisme des lipides, ce qui altère le processus normal de régulation des lipides et du glucose, conduisant à l'insulinorésistance et au syndrome métabolique. Les hydroperoxydes sont aussi instables et peuvent se décomposer en produits secondaires potentiellement toxiques notamment les aldéhydes (malondialdéhyde, 4-hydroxy-2-nonénal), les cétones et les alcools. Il a été déjà démontré qu'une exposition prolongée à ces substances peut induire à des états de stress oxydatif systémique, ayant potentiellement un impact sur le vieillissement cellulaire et certaines maladies neurodégénératives.

Les conclusions de cette recherche montrent que les huiles employées pour la friture des beignets, produits et vendus de manière informelle, présentent souvent une acidité excessive et sont également hors des normes, leur acidité dépassant largement 0.6 KOH/g.

En effet, l'indice d'acide moyen de tous les échantillons examinés a été de loin supérieur aux normes (IA = 5.54±2.57) et aucun d'eux n'a affiché un indice qui respecte les normes du Codex Alimentarius (2009), les huiles alimentaires d'acidité acceptable devraient en fait avoir une acidité inférieure à 0.6 mg KOH/g.

Il a été enregistré un indice d'acide moyen de 5.50±2.49 mg KOH/g, 5.59±2.71 mg KOH/g et 5.74±2.63 mg KOH/g respectivement pour les communes Ntahangwa, Mukaza et Mugere, qui sont tous statistiquement égaux (P>0.05).

Au regard de ces résultats, il est à constater que les beignets artisanaux vendus à Bujumbura et ses environs sont excessivement acides, exposant ainsi les consommateurs à divers risques tels que le cancer associé à l'acroléine, un produit dérivé de la déshydratation du glycérol à haute température et les troubles digestifs (comme les douleurs abdominales, les nausées ou les diarrhées). Les huiles à forte teneur acide réduisent également leur valeur nutritive en augmentant le risque de dégradation des acides gras essentiels et des vitamines solubles dans les huiles (A, D, E et K).

L'analyse comparative des chromatogrammes d'acides gras d'huiles de l'échantillon témoin et des échantillons d'huiles utilisées dans la fabrication des beignets montre que les pics d'acides gras qui apparaissent dans le chromatogramme d'échantillon témoin ont remarquablement régressé ou n'existent plus dans les chromatogrammes d'huiles usagées. Ces régressions et disparitions des pics sont probablement liées à la dégradation des acides gras (un pic correspond l'élution d'un acide gras) en leurs produits de décomposition principalement par oxydation et hydrolyse lipidique. En analysant les chromatogrammes, il a été constaté que les huiles utilisées pour la friture des beignets ont perdu, tant qualitativement que quantitativement, les acides gras nécessaires aux consommateurs. En les consommant, surtout ceux produits artisanalement, ils s'exposent à des effets néfastes. En effet, lors de la décomposition des huiles, les acides gras se transforment en produits potentiellement toxiques comme les radicaux libres, qui, par leur grande réactivité, engendrent d'autres produits également toxiques. Cela expose les consommateurs à des conséquences indésirables telles que le stress oxydatif, le vieillissement cellulaire, l'endommagement des membranes cellulaires, des protéines et de l'ADN. Le risque de maladies chroniques telles que les maladies cardiovasculaires et neurodégénératives, cancer du foie et des reins s'accélère également.

Par rapport aux hypothèses de recherche, cette étude les a toutes confirmées. En effet, les huiles de friture utilisées pour la production de beignets à Bujumbura présentent des taux élevés de peroxyde et d'acides gras libres ; les indices de peroxyde et d'acidité des huiles utilisées pour la friture des beignets dépassent généralement les normes du Codex Alimentarius (2019) et probablement, en raison d'un mauvais stockage, d'une surchauffe et d'une réutilisation des huiles, leur composition en acides gras diminue qualitativement et quantitativement.

RECOMMANDATIONS ET SUGGESTIONS

Au regard des résultats obtenus au cours de la présente étude, les suggestions et recommandations suivantes peuvent être formulées :

- **A l'Etat :**

➢ Renforcer le contrôle de la qualité : mettre en place un système régulier de contrôle de la qualité des huiles utilisées dans la friture des produits alimentaires, notamment dans des usines de production et les lieux de ventes informels ou formels,

➢ Sensibilisation des utilisateurs : organiser des campagnes d'information à l'intention des commerçants et restaurateurs/cafétarias sur les risques liés à la réutilisation excessive des huiles et les bonnes pratiques de conservations,

➢ Encadrement réglementaire : renforcer la réglementation nationale sur les huiles alimentaires notamment en définissant des seuils acceptables d'indices pour les produits sur le marché,

- **Aux industriels des huiles alimentaires :**

  ➢ Se rassurer de la qualité des huiles produites en se référant aux normes de la qualité en vigueur

  ➢ Sensibiliser aux clients les bonnes pratiques de cuisson, d'utilisation et de stockage des huiles alimentaires,

- **Aux producteurs locaux des beignets :**

➢ Conserver les huiles dans les flacons opaques et hermétiquement fermées pour les protéger contre la lumière, l'eau et l'air. Ces flacons devraient être mis également dans un milieu ni trop chaud ni trop froid.

➢ Eviter le chauffage prolongé et la réutilisation des huiles alimentaires

- **Aux chercheurs :**

➢ Etudier tous les paramètres dans le cadre de l'évaluation complète de la qualité des huiles alimentaires sur les produits frits (beignets, frites de pomme de terre très consommés dans les restaurants, cabarets et ménages, les frites de patate douce, les viandes,…etc.)

➢ Prendre des mesures strictes pendant les analyses pour minimiser les erreurs d'analyses et le bruit instrumental**.**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Afssa. (2005). Risques et bénéfices, des acides gras trans pour la santé apportés par les aliments-Recommendations, Agence Francaise de securite Sanitaire(AFSSA). 221.
2. Ait gana Dihia & Azzoune Cylia. (2019). Etude comparative de la stabilité des huiles de table (Afia, Elio et Fleurial) lors des fritures répétées. 106.
3. Alimentarius, Codex. (2009). Normes Alimentaires Internationales pour les Huiles Végétales : Codex Stan 210-1999. FAO-WHO : Suisse.
4. Belitz, .H.D., & Grosch, W. & Schieberle, P. (2004). Food chemistry (T. from the F. G. E. by M. M. Burghagen (ed.)). Third revised Edition with 472 Figures over 900 Formula and 620 Tables.
5. Benachenhou C.,M. (2013). Détermination de la capacité antioxydante des huiles végétales : Elio Cévital. Universite Abou Bekr Beljaid,Faculté des sciences Département de chimie Laboratoire de spectochimie et pharmacologie structurale,Algerie. Mémoire de Master En Chimie Option : Chimie Physique et Analytique Académique, 104.
6. Benhamou. (2017). Evaluation de la qualite des huiles de bains de fritures des fastfoods de la ville d'Azeffoune (p. 72).
7. Bordin, K., Kunitake, M. T., Aracava, K. K., Silvia, C., & Trindade, F. (2013). Changes in food caused by deep fat frying – A review. 63(9).
8. Boukazoula, A. D. E. (2021). Etude des effets toxiques des huiles végétales oxydées sur la physiologie et le métabolisme cellulaire des lapins. (THÈSE & E. S. E. V. D. L. D. D. D. D. F. : S. Biologiques (eds.); thèse en V).
9. Choe, E., & Min, D. B. (2007a). Chemistry of deep-fat frying oils. Journal of Food Science , 72(5), R77 – R86. 72, 2007.
10. Choe, E., & Min, D. B. (2007b). Chemistry of Deep-Fat Frying Oils.pdf. JFS R: Concise Reviews/Hypotheses in Food Science Chemistry.
11. Choe, E., & Min, D. B. (2006). Mechanisms and Factors for Edible Oil Oxidation. 5, 169–186.
12. Combe, N., & Rossignol-castera, A. (2010). Huiles végétales et friture. Cahiers de Nutrition et de Diététique, 45(6), S44–S51. https://doi.org/10.1016/S0007-9960(10)70007-9
13. Cristina, P., Freire, M., Cristina, L., Lobo, B., Freitas, S., Aparecida, T., & Castro, P. De. (2013). Quality of deep frying oils and fats used in street-fairs in Goiânia , Brazil. 33(3), 569–576.
14. Cuvelier & Maillard. (2012). Stabilité des huiles alimentaires au cours de leur stockage To cite this version : HAL Id : hal-01173805 des huiles alimentaires au cours de leur stockage Stabilit e. 1–14.
15. Cuvelier, M.-E. &, & Maillard, M.-N. (2012). Stabilit_e des huiles alimentaires au cours de leur stockage. 19(2), 125–132.

16. Diakite, K., Diagouraga, S., & Diawara, M. (2022). Etude des paramètres physico-chimiques des huiles de graine de coton produites en zone CMDT au Mali Study of the physicochemical parameters of cottonseed oils produced in the CMDT zone in Mali. 16(June), 1320–1330. http://www.ifgdg.org
17. FAO/WHO. (2010). Fats and fatty acids in human nutrition: Report of an expert consultation. (Vol. 550). FAO Food and Nutrition Paper No. P91.
18. FAO. (1994). Storage , transport and packaging of oils . Africa.
19. FAO. (2021). Activités de la FAO concernant la sécurité sanitaire et la qualité des aliments. 2021.
20. Frank D. Gunstone, Harwood, J. L., & Dijkstra, A. J. (2007). The Lipid Handbook (3rd ed.). CRC Press.
21. Gharby, S., Asbbane, A., Nid, M., & Gagour, J. (2025). Vegetable oil oxidation : Mechanisms , impacts on quality , and approaches to enhance shelf life. Food Chemistry: X, 28(May), 102541. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102541
22. Gunstone, F. D. (2011). VEGETABLE OILS IN food technology: composition,property and uses.
23. Gunstone, F. D. (2004). The chemistry of oils and fats Sources, Composition, Properties and Uses. ß 2004 by Blackwell Publishing Ltd%0AEditorial/ISBN 1-4051-1626-9%0APublished
24. Gutteridge., B. H. & J. M. C. (2015). Free Radicals in Biology and Medicine . Oxford University Press, 2015. Pp. xxxviii + 905. Price GBP 70.00 (paperback, ISBN 9780198717485), GBP 125.00 (hard- back, ISBN 9780198717478). 00.
25. Habonimana, P., Barankanira, E., & Niyongabo, D. (2024). Changes in the Palm Oil Values during the Frying Process of the Wheat Flour Doughnuts. 18(8), 369–381.
26. Esterbauer ,H. ,, Rudolf Jorg Schaur, A. (1991). Chemistry and biochemistry of 4-hydroxynonenal, malonaldehyde and related aldehydes. Review Article Chemistry, 11, 81–128. Institute of Biochemistry, University of Graz, SchubertstraBe 1, A-8010 Graz, Austria
27. Illowsky, B., & Dean, S. (2013). Introductory Statistics. OpenStax, Rice University. disponible sur https://openstax.org/details/books/introductory-statistics.
28. Ilyas, M. C. (2017). Effets des différentes fritures sur les qualités physico-chimiques et nutritionnelles des huiles .P 48.
29. Karamagi, Kamara, F. (2025). Étude de quelques paramètres de qualité des huiles de palme vendues dans les marchés de Bujumbura.M´emoire présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Sciences Chimiques Spécialité : Contrôle et Analyses Chimiques. https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1867.
30. Kouadio K.,F. (2022). Facteurs de risque de détérioration de la qualité de l ' huile brute de palme produite et vendue à Daloa (Haut-Sassandra , Côte d ' Ivoire).République de Côte d'Ivoire Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. MEMOIRE Présenté Pour l'obtention du diplôme de master biotechnologie agroalimentaire et biosecurite alimentaire, 60.

31. Kubow, S. (1990). lipid peroxidaticn products.Trends in Food Science & Technology, 1, 67–71.
32. Laceb M. & Louerguioui. (2022). Etude de la stabilité des huiles de table (tournesol, soja et olive) lors des fritures répétées. P74.
33. Lecerf, J. (2015). Dossier thématique Les huiles végétales : particularités et utilités. March. https://www.researchgate.net/publication/257736077
34. Leong, X. (2021). Lipid Oxidation Products on Inflammation-Mediated Hypertension and Atherosclerosis : A Mini Review. Frontiers in Nutrition, 8(September), 1–7. https://doi.org/10.3389/fnut.2021.717740
35. Melissa, M. (2022). Effet de l'exposition au soleil sur les caractéristiques physico- chimiques de l'huile de tournesol « Fleurial » Proposé. P43.
36. Miyazawa T. (2021). Lipid hydroperoxides in nutrition , health , and diseases. 97(4), 161–196. No. 4. Proc. Jpn. Acad., Ser. B 97 (2021)
37. Mozaffarian, D., Katan, M. B., Ascherio, A., Stampfer, M. J., Willett, W. C., & Food, T. (2006). Trans Fatty Acids and Cardiovascular Disease. 1601–1613.
38. Nadia, A. (2017). Evaluation de l'altération de l'huile « Elio » au cours de la friture de poisson, « Anchois ». P50.
39. OMS. (2021). Alternatives saines aux acides gras trans. Organisation mondiale de la sante, Region Africaine. https://doi.org/10.3390/nu14071489.
40. Rohr-udilova, N. V, Stolze, K., Sagmeister, S., Nohl, H., Schulte-hermann, R., & Grasl-kraupp, B. (2008). Lipid hydroperoxides from processed dietary oils enhance growth of hepatocarcinoma cells. 352–359. https://doi.org/10.1002/mnfr.200700149
41. Scurtul, S. (2024). Les phénomènes physiques et chimiques lors du traitement des aliments. Ii, 1245–1247.
42. Souleymane, S., Souleymane, Z., & Bougma, S. (2024). Evaluation de la qualité des huiles alimentaires utilisées en friture dans la ville de Ouagadougou , Burkina Faso Evaluation of the quality of edible oils used for frying in the cit ... de Ouagadougou , Burkina Faso. July 2025. https://doi.org/10.4314/ijbcs.v18i4.18
43. Tessier, J. (2012). Effect of cooking on vitamins. XVI, 150–153.
44. Zhang, C., Xi, J., Wang, S., Ma, Y., & Wang, X. (2022). Effects of deep fat frying conditions on the formation of heterocyclic aromatic amines in chicken meat. 2061, 1–10.

ANNEXES

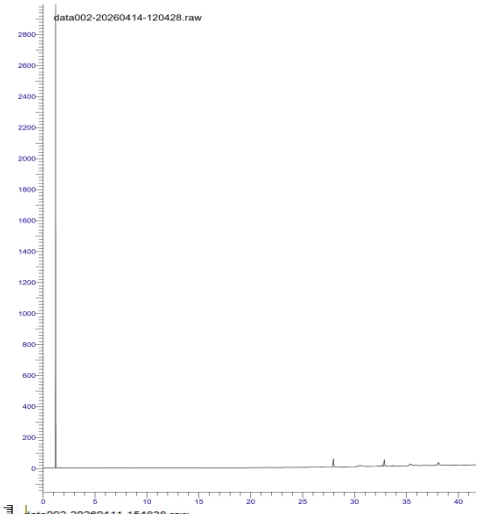
I. DONNEES BRUTES DES PARAMETRES PHSICOCHIMIQUES

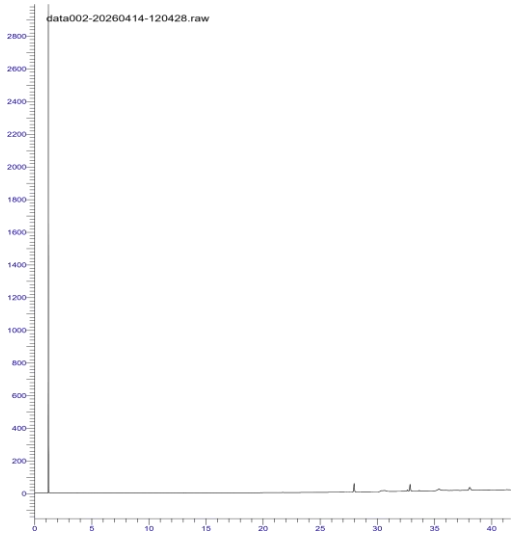
Commune Ntahanwa										
Quartiers	M	V1	V2	N	**IP1**	M	Mm KOH	N KOH	V KOH	**IA**
Kamenge	1.089	16.5	9.9	0.01	60.6	1.0450	56	0.5	0.2	5.3
Kamenge	1.028	12.7	9.9	0.01	27.2	1.0303	56	0.5	0.2	5.4
Kamenge	1.078	13.4	9.9	0.01	32.4	1.0130	56	0.5	0.2	5.5
Kamenge	1.058	16.6	9.9	0.01	63.3	1.0930	56	0.5	0.1	2.5
Kamenge	1.010	**13.9**	9.9	0.01	39.6	1.0225	56	0.5	0.4	10.9
Kamenge	1.112	16.1	9.9	0.01	56.7	1.0559	56	0.5	0.2	5.3
Kamenge	1.081	17.6	9.9	0.01	71.2	1.1261	56	0.5	0.3	7.4
Kamenge	1.044	16.6	9.9	0.01	64.1	1.1335	56	0.5	0.1	2.4
Kamenge	1.045	10.7	9.9	0.01	7.6	1.0722	56	0.5	0.3	7.8
Kamenge	1.169	17.8	9.9	0.01	67.5	1.1055	56	0.5	0.4	10.1
Gasenyi	1.046	15.2	9.9	0.01	50.6	1.0754	56	0.5	0.5	13.0
Gasenyi	1.028	11.8	9.9	0.01	18.4	1.2785	56	0.5	0.2	4.3
Gasenyi	1.042	13.7	9.9	0.01	36.4	1.1753	56	0.5	0.2	4.7
Gasenyi	1.008	11.3	9.9	0.01	13.8	1.0583	56	0.5	0.2	5.2
Gasenyi	1.064	10.3	9.9	0.01	4.9	1.0561	56	0.5	0.2	5.3
Gasenyi	1.076	12.2	9.9	0.01	21.3	1.1003	56	0.5	0.2	5.0
Gasenyi	1.005	10.5	9.9	0.01	5.8	1.0340	56	0.5	0.2	4.1
Gasenyi	1.072	12.2	9.9	0.01	21.3	1.0444	56	0.5	0.2	5.3
Gasenyi	1.003	17.6	9.9	0.01	74.3	1.0379	56	0.5	0.2	5.3
Gasenyi	1.073	11.3	9.9	0.01	14.0	1.1700	56	0.5	0.2	4.7
Ngagara	1.035	12.9	9.9	0.01	28.9	1.1018	56	0.5	0.1	2.5
Ngagara	1.085	11.2	9.9	0.01	11.9	1.0276	56	0.5	0.1	2.7
Ngagara	1.101	10.4	9.9	0.01	4.5	1.0986	56	0.5	0.2	5.0
Ngagara	1.050	10.6	9.9	0.01	6.6	1.0388	56	0.5	0.3	7.7
Ngagara	1.116	18.5	9.9	0.01	77.0	1.0816	56	0.5	0.1	2.5
Ngagara	1.045	13.7	9.9	0.01	36.3	1.0794	56	0.5	0.1	2.5
Ngagara	1.035	18.4	9.9	0.01	82.1	1.1117	56	0.5	0.2	5.0
Ngagara	1.116	10.6	9.9	0.01	6.2	1.0552	56	0.5	0.2	5.3
Ngagara	1.022	12.2	9.9	0.01	22.5	1.0070	56	0.5	0.1	2.7

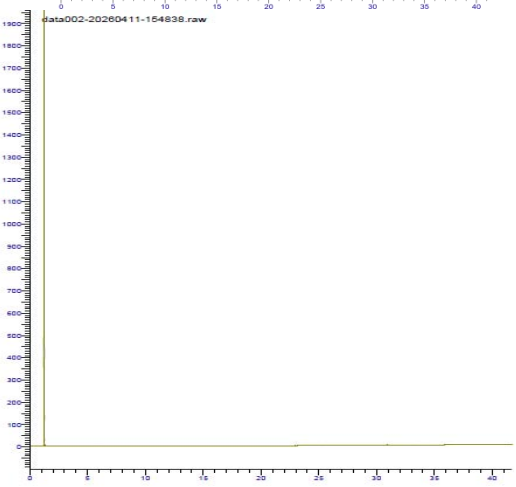
Commune Mukaza										
Quartiers	m	VI	V2	N	**IP2**	M	Mm KOH	N KOH	V KOH	**IA**
Nyakabiga	1.143	17.4	9.9	0.01	65.6	1.034	56	0.5	0.2	5.4
Nyakabiga	1.035	15	9.9	0.01	49.2	1.048	56	0.5	0.2	5.3
Nyakabiga	1.043	13.5	9.9	0.01	34.5	1.092	56	0.5	0.2	5.1
Nyakabiga	1.022	16.7	9.9	0.01	66.5	1.059	56	0.5	0.1	2.6
Nyakabiga	1.065	14.3	9.9	0.01	41.3	1.106	56	0.5	0.4	10.1
Nyakabiga	1.069	15.9	9.9	0.01	56.1	1.097	56	0.5	0.3	7.6
Nyakabiga	1.094	17.8	9.9	0.01	72.2	1.005	56	0.5	0.3	8.3
Nyakabiga	1.075	16.5	9.9	0.01	61.3	1.060	56	0.5	0.1	2.3
Nyakabiga	1.61	10.6	9.9	0.01	6.5	1.046	56	0.5	0.3	8.0
Nyakabiga	1.055	18.0	9.9	0.01	76.7	1.034	56	0.5	0.4	10.8
Jabe-Bwiza	1.081	15.1	9.9	0.01	48.1	1.093	56	0.5	0.5	12.8
Jabe-Bwiza	1.048	11.9	9.9	0.01	19	1.043	56	0.5	0.2	5.3
Jabe-Bwiza	1.069	13.2	9.9	0.01	30.8	1.059	56	0.5	0.1	2.6
Jabe-Bwiza	1.024	11.4	9.9	0.01	14.6	1.007	56	0.5	0.2	5.5
Jabe-Bwiza	1.002	10.4	9.9	0.01	4.9	1.027	56	0.5	0.2	5.4
Jabe-Bwiza	1.002	12.4	9.9	0.01	24.9	1.008	56	0.5	0.2	5.5
Jabe-Bwiza	1.036	10.4	9.9	0.01	4.6	1.010	56	0.5	0.2	5.5
Jabe-Bwiza	1.085	12.3	9.9	0.01	22.1	1.040	56	0.5	0.2	5.3
Jabe-Bwiza	1.102	18.2	9.9	0.01	75.3	1.037	56	0.5	0.2	5.4
Jabe-Bwiza	1.065	11.6	9.9	0.01	15.9	1.017	56	0.5	0.2	5.5
Buyenzi	1.102	12.8	9.9	0.01	26.3	1.060	56	0.5	0.1	2.6
Buyenzi	1.032	11.4	9.9	0.01	14.5	1.075	56	0..5	0.1	2.6
Buyenzi	1.056	10.3	9.9	0.01	3.7	1.013	56	0.5	0.2	5.5
Buyenzi	1.044	10.5	9.9	0.01	5.4	1.009	56	0.5	0.3	8.3
Buyenzi	1.032	17.8	9.9	0.01	76.5	1.011	56	0.5	0.1	2.7
Buyenzi	1.029	13.6	9.9	0.01	34.9	1.036	56	0.5	0.1	2.7
Buyenzi	1.005	18.3	9.9	0.01	83.5	1.026	56	0.5	0.2	5.4
Buyenzi	1.004	10.6	9.9	0.01	6.9	1.017	56	0.5	0.2	5.5
Buyenzi	1.117	12.3	9.9	0.01	21.4	1.068	56	0.5	0.1	2.6
Buyenzi	1.102	14.5	9.9	0.01	41.7	1.024	56	0.5	0.3	8.2

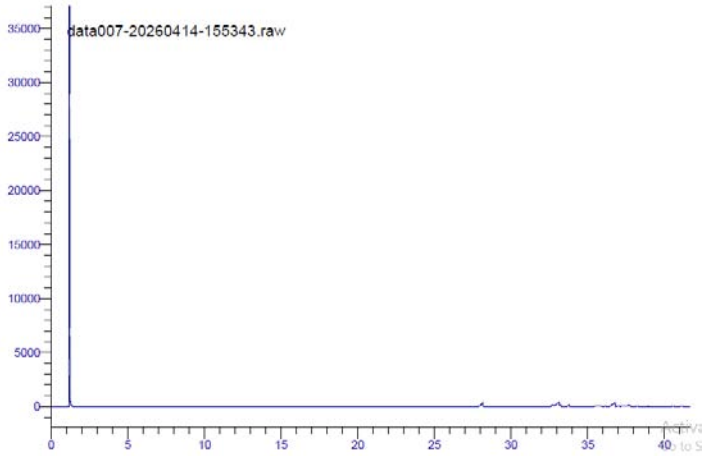
Commune Mugere										
Quartiers	M	V1	V2	N	**IP3**	m	Mm KOH	N KOH	V KOH	**IA**
Musaga	1.025	16.2	9.9	0.01	61.4	1.011	56	0.5	0.2	5.5
Musaga	1.091	14.7	9.9	0.01	43.9	1.007	56	0.5	0.1	5.5
Musaga	1.033	12.9	9.9	0.01	29.0	1.049	56	0.5	0.2	5.3
Musaga	1.095	16.5	9.9	0.01	60.2	1.037	56	0.5	0.1	2.7
Musaga	1.031	14.6	9.9	0.01	45.5	1.027	56	0.5	0.4	10.9
Musaga	1.082	16.1	9.9	0.01	57.3	1.062	56	0.5	0.3	7.9
Musaga	1.065	17.5	9.9	0.01	71.3	1.107	56	0.5	0.3	7.5
Musaga	1.112	16.4	9.9	0.01	58.4	1.077	56	0.5	0.1	2.5
Musaga	1.025	10.9	9.9	0.01	9.7	1.086	56	0.5	0.3	7.7
Musaga	1.083	18.3	9.9	0.01	77.5	1.092	56	0.5	0.4	10.2
Busoro	1.089	16.1	9.9	0.01	56.9	1.030	56	0.5	0.5	13.5
Busoro	1.042	11.6	9.9	0.01	16.3	1.001	56	0.5	0.2	5.5
Busoro	1.055	13.9	9.9	0.01	37.9	1.088	56	0.5	0.2	5.1
Busoro	1.023	11.4	9.9	0.01	14.6	1.028	56	0.5	0.2	5.4
Busoro	1.024	10.5	9.9	0.01	5.8	1.049	56	0.5	0.2	5.3
Busoro	1.132	12.8	9.9	0.01	25.6	1.057	56	0.5	0.2	5.2
Busoro	1.046	10.6	9.9	0.01	6.6	1.071	56	0.5	0.2	5.2
Busoro	1.046	12.1	9.9	0.01	21.0	1.059	56	0.5	0.2	5.2
Busoro	1.090	18.1	9.9	0.01	75.2	1.042	56	0.5	0.2	5.3
Busoro	1.049	11.5	9.9	0.01	15.2	1.003	56	0.5	0.2	5.5
Kanyosha	1.029	12.4	9.9	0.01	24.2	1.074	56	0.5	0.1	2.6
Kanyosha	1.002	11.6	9.9	0.01	16.9	1.021	56	0.5	0.1	2.7
Kanyosha	1.096	10.5	9.9	0.01	5.4	1.009	56	0.5	0.2	5.5
Kanyosha	1.071	10.7	9.9	0.01	7.4	1.032	56	0.5	0.3	8.1
Kanyosha	1.084	17.9	9.9	0.01	73.8	1.009	56	0.5	0.1	2.7
Kanyosha	1.006	13.9	9.9	0.01	39.4	1.087	56	0.5	0.1	2.5
Kanyosha	1.007	18.1	9.9	0.01	81.4	1.0.91	56	0.5	0.2	5.1
Kanyosha	1.020	10.9	9.9	0.01	9.8	1.002	56	0.5	0.2	5.5
Kanyosha	1.105	12.4	9.9	0.01	22.6	1.097	56	0.5	0.1	2.5
Kanyosha	1.115	14.4	9.9	0.01	41	1.029	56	0.5	0.3	8.1

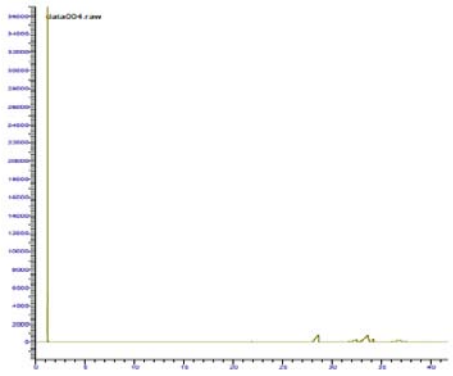
II. CHROMATOGRAMMES DES ACIDES GRAS

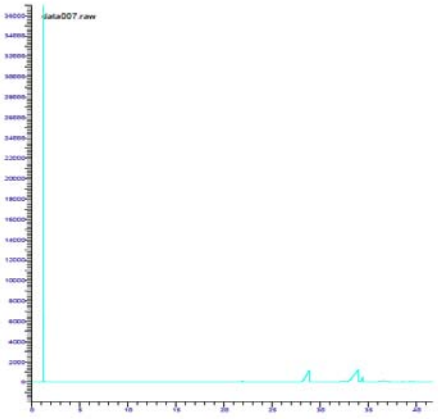


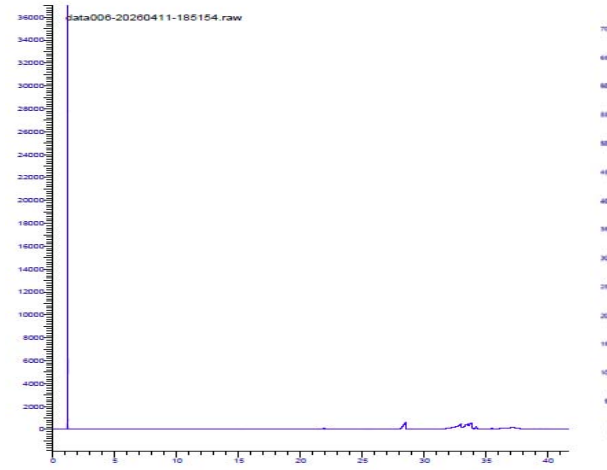


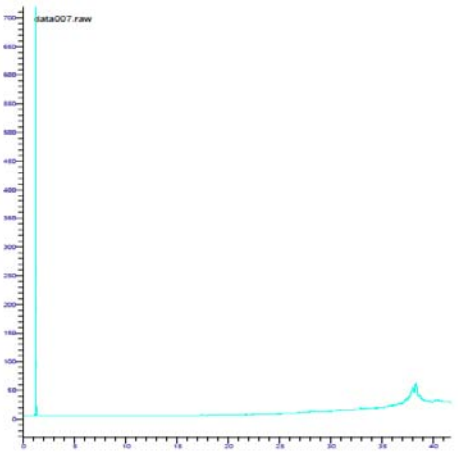


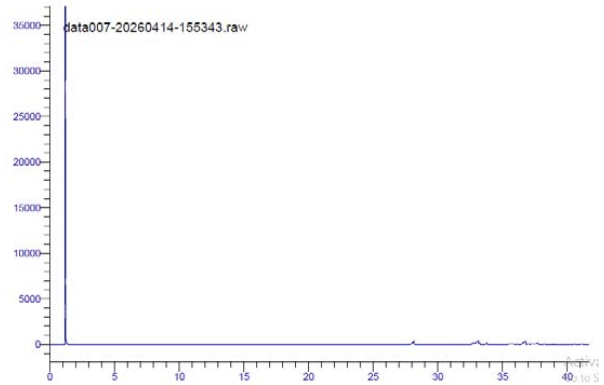


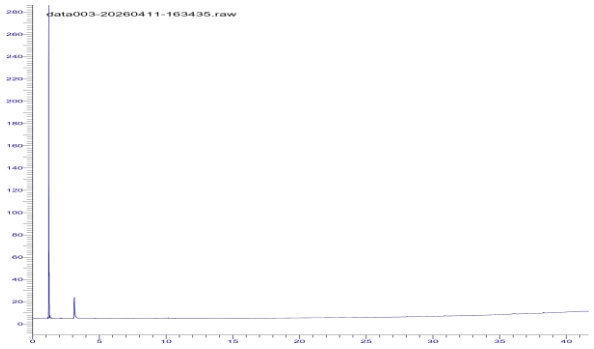




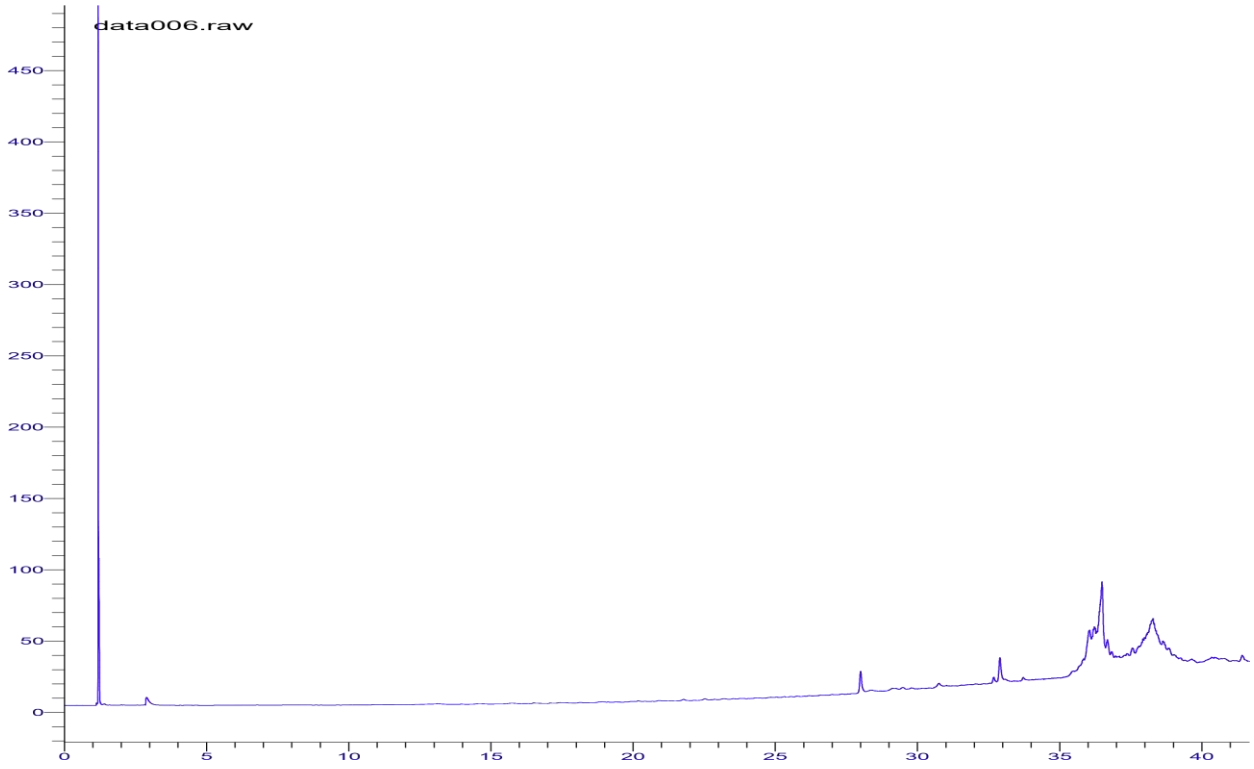

data006-20260411-185154.raw


data007.raw


data007-20260414-155343.raw


data003-20260411-163435.raw

Témoin :


data006.raw