



Influence des conditions de friture profonde sur les propriétés physicochimiques de la banane plantain Musa AAB “ harton ” : étude du vieillissement des huiles et modélisation des transferts de matière au cours du procédé

Nadia Pambou-Tobi

► To cite this version:

Nadia Pambou-Tobi. Influence des conditions de friture profonde sur les propriétés physicochimiques de la banane plantain Musa AAB “ harton ” : étude du vieillissement des huiles et modélisation des transferts de matière au cours du procédé. Génie chimique. Université de Lorraine; Université Marien-Ngouabi (Brazzaville), 2015. Français. NNT : 2015LORR0063 . tel-02321375

HAL Id: tel-02321375

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02321375>

Submitted on 21 Oct 2019

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

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



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

UNIVERSITE DE LORRAINE

Ecole Doctorale Ressources Procédés Produits Environnement

Laboratoire d'Ingénierie des Biomolécules

UNIVERSITE MARIEN NGOUABI

Facultés des sciences et technique

Formation doctorale Transformation Alimentaires des Agroressources

THESE EN CO-TUTELLE

Pour obtenir les grades de Docteur de l'Université de Lorraine et Docteur/Ph.D. de l'Université Marien
NGOUABI

Spécialité : Procédés Biotechnologiques et Alimentaires / Chimie et Technologie Alimentaires

Par

Nadia Pamela Gladys PAMBOU-TOBI

**Influence des conditions de friture profonde sur les propriétés physicochimiques de la banane
plantain *Musa* AAB « harton » : étude du vieillissement des huiles et modélisation des transferts de
matière au cours du procédé**

Soutenance unique à l'Université de Lorraine, le 5 Juin 2015 devant la commission d'examen

Membres du Jury :

Président :

M. Thomas SILOU Professeur, Université Marien NGouabi

Rapporteurs :

M. Hilaire Macaire WOMENI Docteur HDR, Université de Dschang

M. Pierre-Yves PONTALIER Docteur HDR, INRA/INP-ENSIACET Toulouse

Membres examinateurs :

M. Michel LINDER Professeur, Directeur de thèse, Université de Lorraine

Mme Rosalie KAMA NIAMAYOUA MdC (CAMES), Co-directrice de thèse, Université Marien NGouabi

M. Mohamed GHOU L Professeur, Université de Lorraine

REMERCIEMENTS

Cette thèse a vu le jour grâce à la participation, le soutien et l'aide de plusieurs personnes que j'aimerais remercier au terme de ce travail.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements aux représentants de l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF), pour avoir accepté de financer ce travail de thèse en cotutelle entre l'Université Marien Ngouabi (UMNG) de Brazzaville au Congo et l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires de l'université de Lorraine. Que les représentants de l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) trouvent ici toute ma reconnaissance, pour avoir choisi mon projet de recherche et m'avoir donné l'opportunité de mener à bien cette thèse.

Je remercie particulièrement M. Michel Linder, Professeur au Laboratoire d'Ingénierie des Biomolécules (LIBio) de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (ENSAIA), et Directeur du LIBio, mon Directeur de thèse, qui a orienté ce travail et qui au cours de ces cinq dernières années m'a soutenue en m'accordant pleinement sa confiance. Je le remercie aussi pour sa disponibilité, l'autonomie scientifique qu'il a su m'accorder, ses précieux conseils et surtout de m'avoir fait partager ses connaissances dans le domaine.

Cette thèse a été réalisée sous la co-direction de Mme Rosalie Kama Niamayoua, Maitre de conférences (CAMES) à l'ENS de l'UMNG que je remercie chaleureusement. Je lui exprime toute ma reconnaissance pour avoir accepté de prendre la co-direction de ce travail, pour son soutien et ses conseils.

Je remercie M. Thomas Silou, Professeur à la faculté des sciences et techniques de l'UMNG, coordonnateur de la formation doctorale « Transformation Alimentaire des Agro-ressources » pour m'avoir autorisé à préparer ma thèse dans la formation doctorale qu'il dirige.

Je tiens à remercier M. Mohamed Ghoul, Professeur au Laboratoire d'Ingénierie des Biomolécules (LIBio) de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (ENSAIA) pour sa disponibilité et pour avoir accepté de s'impliquer en me

faisant bénéficier de son aide par la conception de modèles mathématiques concernant la modélisation de transfert de matière.

J'exprime également mes remerciements à M. Joël Scher, Professeur au Laboratoire d'Ingénierie des Biomolécules (LIBio) de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (ENSAIA) et ancien Directeur du LIBio pour m'avoir accepté au sein du laboratoire.

Je tiens aussi à remercier Messieurs Pierre-Yves Pontalier et Hilaire Macaire Womeni pour avoir accepté de juger ce travail en qualité de rapporteurs.

J'adresse Mes vifs remerciements et ma gratitude à M. Armand Moyikoua, Professeur et Recteur de l'Université Marien Ngouabi (UMNG) de Brazzaville au Congo, pour le soutien académique et administratif durant la préparation de ma thèse.

Mes sincères remerciements vont également au personnel du LIBio, particulièrement à ceux qui m'ont formé dans l'utilisation du matériel.

Je n'oublie pas non plus tous mes collègues chercheurs avec lesquels j'ai passé des moments de gaieté et de dur labeur. Il s'agit notamment de : Ange Essono, Ghazi Ben, Adrien Jacquot, Mariam pour l'ambiance chaleureuse partagée ensemble dans le bureau ; Citlali Gonzalez, Chancelle Ndanguï, Charlotte Jacquot, Jennifer Burgain, Yoana Nikolova, Magda Corgneau, Mahmoud Hassan, Mohamed Roby, Mouna Kacy et Marie-celeste Techer.

Que mes tendres amies Vasthie, Clara, Mirabelle, Alix ainsi que ma cousine Annaïse, trouvent en ces mots mes remerciements pour leur soutien, leurs encouragements tout au long de la préparation de cette thèse.

Enfin je voudrais adresser un grand merci à :

- ✓ mes parents, monsieur et madame TOBI-N'DZABA, sans lesquels, cette thèse n'aurait pu voir le jour,
- ✓ mes frères aînés Hervé, N'kaya et Tobi, pour leur soutien et leurs encouragements,

- ✓ à ma sœur cadette Jessica, qui aura été pendant mes longues absences la mère de substitution pour ma fille en sus de ses propres obligations,
- ✓ à ma fille chérie Andréa qui fait la joie de mon cœur et à qui j'ai volé l'amour et les soins auxquels elle avait droit, et enfin à Landry, mon fiancé pour sa patience et sa compréhension.

Liste des communications

Article dans un journal à comité de lecture :

N.P.G Pambou-tobi, Elmira Arab-Tehrany, Rosalie Kama Niamayoua and Michel Linder. RSM applied for optimization of deep-fat fried ripe plantain slices and study of oxidation kinetics of oil by a DSC and polar methods (Journal of Food Science and Technology, XX(X): XX–XX; accepté).

Communications par affiche :

Nadia Pambou-tobi, Rosalie Kama Niamayoua, Michel Linder. Optimisation des conditions de friture profonde de la banane plantain : influence de la composition des huiles de friture » (Séminaire école doctorale RP2E, 17 janvier 2013 à Nancy).

TABLE DES MATIERES

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	3
1 INTRODUCTION GENERALE.....	19
2 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	23
2.1 Culture mondiale de la banane plantain et des produits amylacés : valeur nutritionnelle et transformation	23
2.1.1 Culture, production et botanique de la banane plantain	23
2.1.2 Transformation de la banane plantain et d'autres produits frits amylacés	27
2.1.3 Valeur nutritionnelle du plantain	28
2.2 LES HUILES VEGETALES UTILISEES DANS LES PROCEDES DE FRITURE PROFONDE	32
2.2.1 Généralités sur les huiles végétales alimentaires	32
2.2.2 Productions d'huiles	32
2.2.3 Composition des huiles alimentaires	34
2.2.4 Les acides gras	34
2.3 LE PROCEDE DE FRITURE	39
2.3.1 Les différents modes et dispositifs de friture	39
2.3.2 Principes de l'opération de friture.....	41
2.3.3 Dispositif de friture	41
2.3.4 Les principales variables du procédé de friture	42
2.3.5 Principes physiques de l'opération de friture.....	47
2.3.6 Modélisation des transferts lors de la friture.....	59
2.3.7 Altérations des huiles de friture	61
2.3.8 Les produits formés au cours du vieillissement de l'huile	65
2.4 MAITRISE DES TECHNIQUES DE SUIVI DU VIEILLISSEMENT DES HUILES DE FRITURE PROFONDE.....	69
2.4.1 Aspects législatifs	69
2.4.2 Les matériels utilisés (capteurs)	70
3 PLAN D'EXPERIENCES	71

3.1	INTRODUCTION :	71
3.1.1	Choix des facteurs	72
3.1.2	Choix de la RSM	72
4	MATERIEL ET METHODES	77
4.1	MATERIEL	77
4.1.1	La banane plantain	77
4.1.2	Les huiles de friture	77
4.1.3	L'équipement de friture	78
4.1.4	Procédure expérimentale de la friture de la banane plantain suivant un plan d'expériences	79
4.1.5	Viellissement de l'huile au cours du temps dans les conditions optimales de friture	81
4.2	ANALYSES PHYSICOCHIMIQUES DE LA BANANE PLANTAIN ET DES HUILES VEGETALES	82
4.2.1	Analyses sur la banane plantain	82
4.2.2	Analyses sur les huiles de friture	86
4.3	CINETIQUES DE PERTE EN EAU ET GAIN D'HUILE	93
4.4	OUTILS MATHEMATIQUES ET STATISTIQUES	93
5	RESULTATS ET DISCUSSION	95
5.1	LES HUILES VEGETALES UTILISEES DANS LE PROCEDE DE FRITURE PROFONDE	95
5.1.1	Composition en acides gras des huiles de friture	95
5.1.2	Propriétés physicochimiques des huiles végétales	97
5.2	PROPRIETES PHYSICOCHIMIQUES DE LA BANANE PLANTAIN	99
5.2.1	Composition de la banane plantain	99
5.2.2	Analyses morphologiques et gélatinisation de l'amidon de la banane plantain	102
5.3	OPTIMISATION DES CONDITIONS DE FRITURE PROFONDE PAR LA METHODE DES SURFACES DE REPONSE	103
5.3.1	Utilisation d'un plan d'expériences de Doehlert	103

5.3.2	Réponses et modèles mathématiques étudiés avec l'huile Frial dans le procédé de friture profonde de la banane plantain	104
5.3.3	Réponses et modèles mathématiques étudiés avec l'huile de soja dans le procédé de friture profonde de la banane plantain.....	116
5.4	MESURE DE VIEILLISSEMENT DES HUILES AU COURS DE LA FRITURE PROFONDE DE LA BANANE PLANTAIN.....	126
5.4.1	Evolution du profil d'acides gras des différentes huiles végétales en fonction de la durée du procédé de friture profonde.....	126
5.4.2	Evolution de la teneur en composés polaires.....	129
5.4.3	Evolution de la viscosité dynamique.....	131
5.4.4	Evolution des indices chimiques en fonction du vieillissement des huiles de friture.....	135
5.4.5	Mesures des diènes et triènes conjugués	139
5.4.6	Evolution des propriétés thermiques lors du vieillissement des bains d'huiles.....	141
5.4.7	Evolution de la couleur de l'huile de friture	148
5.5	EVALUATION DES PROPRIETES PHYSICOCHIMIQUES DE LA BANANE PLANTAIN AU COURS DU VIEILLISSEMENT DES HUILES	150
5.5.1	Evolution de la couleur de la banane plantain frite.....	150
5.5.2	Mesure de la teneur en eau et huile	153
5.5.3	Evaluation du profil de texture de la banane plantain	154
5.6	OBSERVATION DE LA STRUCTURE DE LA BANANE PLANTAIN AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE.....	156
5.7	DESCRIPTION DU TRANSFERT DE MASSE AU COURS DE LA FRITURE PROFONDE	158
5.7.1	Evaluation de la cinétique de perte de masse de la banane plantain au cours de la friture	158
5.7.2	Modélisation de la cinétique de perte en eau et gain d'huile de la banane plantain dans les conditions contrôlées (température et épaisseur)	159
6	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	174
7	REFERENCES BIBLIORAPHIQUES	180

Listes des figures

Figure 2-1 : Évolution des principaux groupes génomiques de la série <i>Eumusa</i> (Jones, 2000) cité par Lassois <i>et al.</i> , 2009.....	24
Figure 2-2 : Stades de maturation des fruits du bananier, échelle de 2 à 7	26
Figure 2-3 : Mesure de la température de l'huile d'olive au cours de la friture à la température initiale de 170°C et pour une charge de 1/7 Kg de pommes de terre/ L d'huile à une distance 1, 2 et 4 cm de la surface du bain (Lioumbas <i>et al.</i> , 2012).	45
Figure 2-4 : Les profils de température de l'huile pour les deux charges au cours de la friture à la température initiale de l'huile (180°C). La courbe verte représente l'huile d'olive et la courbe orange l'huile de palme (Lioumbas <i>et al.</i> , 2012).....	45
Figure 2-5 : Profils de température au centre du bâtonnet de pomme de terre pour différentes charges au cours de la friture à la température initiale de 180°C. La courbe verte représente l'huile d'olive et la courbe orange l'huile de palme (Lioumbas <i>et al.</i> , 2012).	46
Figure 2-6: Transferts de chaleur et de masse au cours de la friture d'un aliment (Gupta, 1993) schéma repris par Dincer et Yildiz, (1996) et modifié.....	49
Figure 2-7 : Coefficient de transfert de chaleur pendant la friture de l'échantillon moyen de la patate douce ($D / L = 13,5$) (rapport entre diamètre et épaisseur de l'échantillon) (Farinu et Baik, 2007).....	50
Figure 2-8 : Variation du coefficient de transfert de chaleur (valeur moyenne des dix expériences avec écart-type) durant la friture atmosphérique en fonction du temps de friture (Erdogdu et Dejmek, 2010).	52
Figure 2-9 : Teneur en huile absorbée ou restée à la surface de frites lors de la friture (170°C) et du refroidissement (20°C) [la discrimination de la teneur en huile absorbée et de surface en utilisant la méthode Moreira <i>et al.</i> , (1997) avec de l'éther de pétrole]. Schéma repris par Courtois <i>et al.</i> , 2012).	55
Figure 2-10 : Schéma simplifié de la réaction de Maillard adapté de Hodge (1953) et repris par Cheriote, 2007.	59
Figure 2-11 : Représentation schématique du mécanisme réactionnel de l'auto-oxydation des lipides (Villière et Genot, 2006).	64
Figure 2-12 : structure de l'acrylamide (Claeys <i>et al.</i> , 2005)	66
Figure 5-1 : Courbes d'isoreponses de la teneur en eau de la banane plantain frite (Y_1) dans le cas de l'huile Frial.....	110
Figure 5-2 : Chemin optimal pour la réponse teneur en eau de la banane plantain après friture.....	111

Figure 5-3 : Chemin optimal pour la réponse teneur en huile de la banane plantain après friture.....	111
Figure 5-4 : Courbes d'isoréponses de la teneur en huile de la banane plantain frite (Y_2) dans le cas de l'huile Frial	112
Figure 5-5 : Courbes d'isoréponses de la dureté de la banane plantain frite (Y_3) dans le cas de l'huile Frial	113
Figure 5-6 : Chemin optimal pour la réponse dureté de la banane plantain après friture....	114
Figure 5-7: Chemin optimal pour la réponse couleur de la banane plantain après friture...	114
Figure 5-8 : Courbes d'isoréponses de la couleur (ΔE) du plantain frit (Y_4) dans le cas de l'huile Frial.....	115
Figure 5-9 : Courbes d'isoréponses de la teneur en eau de la banane plantain frite (Y_1) dans le cas de l'huile de soja.....	120
Figure 5-10 : Chemin optimal pour la réponse teneur en eau de la banane plantain après friture avec l'huile de soja.....	121
Figure 5-11 : Chemin optimal pour la réponse teneur en huile de la banane plantain après friture avec l'huile de soja.....	121
Figure 5-12 : Courbes d'isoréponses de la teneur en huile de la banane plantain frite (Y_2) dans le cas de l'huile de soja.....	122
Figure 5-13 : Courbes d'isoréponses de la dureté du plantain frit (Y_3) dans le cas de l'huile de soja.....	123
Figure 5-14 : Chemin optimal pour la réponse dureté de la banane plantain après friture avec l'huile de soja	124
Figure 5-15 : Chemin optimal pour la réponse couleur de la banane plantain après friture avec l'huile de soja.	124
Figure 5-16 : Courbes d'isoréponses de la couleur (ΔE) de la banane plantain frite (Y_4) dans le cas de l'huile de soja.....	125
Figure 5-17 : Corrélations entre les CPT mesurés par capteur Ebro et méthode chromatographique pour les différentes huiles (Frial, soja et d'huile de palme raffinée oléine HPRO).....	131
Figure 5-18 : Evolution de la viscosité (en mPa.s) mesurée à 25°C en fonction de la quantité de banane plantain frit dans les différentes huiles (Frial, soja et d'huile de palme raffinée oléine HPRO).	133
Figure 5-19 : Corrélations entre les CPT mesurés par capteur électronique en fonction de la viscosité des différentes huiles (Frial, soja et d'huile de palme raffinée oléine HPRO).	134

Figure 5-20 : Corrélations entre les CPT mesurés par méthode chromatographique en fonction de la viscosité des différentes huiles (Frial, soja et d'huile de palme raffinée oléine HPRO).....	134
Figure 5-21 : Corrélations entre la viscosité mesurée à 25°C et les diènes conjugués pour les différentes huiles (Frial, soja et d'HPRO).	141
Figure 5-22 : Evolution du profil thermique mesuré par DSC en fonction de la quantité de banane plantain frite dans les différentes huiles (Frial, soja et d'huile de palme raffinée oléine HPRO).....	144
Figure 5-23 : Corrélations entre le profil thermique mesuré par DSC et les CPT mesurés par le capteur Ebro pour les différentes huiles (Frial, soja et HPRO).	145
Figure 5-24 : Corrélations entre le profil thermique mesuré par DSC et les CPT mesurés par méthode chromatographique pour les différentes huiles (Frial, soja et d'huile de palme raffinée oléine HPRO).....	146
Figure 5-25 : Evolution de la différence de couleur (ΔE) mesurée par le lovibond pour les différentes huiles (Frial, soja et huile de palme raffinée oléine HPRO).	150
Figure 5-26 : Courbes typiques de double morsure (compression) de la banane plantain mûre fraîche (a) et frite (b) dans les conditions optimales de friture.	155
Figure 5-27 : Observation au microscope électronique optique de la structure de la banane plantain avant friture.....	156
Figure 5-28 : Observation au microscope électronique optique de la structure de la banane plantain après friture.	157
Figure 5-29 : Courbe de pertes de masse de banane plantain et d'eau évaporée.....	159
Figure 5-30 : Mécanismes de transfert de chaleur et de matière lors de la friture de la banane plantain.	160
Figure 5-31 : Courbes (a, b et c) de cinétiques de perte en eau avec simulations pour différents modes de traitement.	166
Figure 5-32 : Courbes (a, b et c) de cinétiques d'absorption d'huile avec les simulations pour différents modes de friture.	172
Figure 8-1 : Banane plantain mûre de variété « Hartons ».....	217
Figure 8-2 : Ensemble du matériel utilisé pour la préparation du plantain : trancheuse électrique SEB (A), enregistreur des données Almemo (B) ; emporte-pièce manuel (C) ; et friteuse ménagère électrique (D).....	218
Figure 8-3 : Différentes huiles végétales utilisées (Frial, soja et palme raffinée oléine).	219
Figure 8-4 : Tranches de banane plantain avant (A) et après (B) friture.	219

Figure 8-5 : Cinétiques de température au cours de la friture de la banane plantain dans de l'huile Frial.....	220
Figure 8-6 : Cinétiques de température au cours de la friture de banane plantain dans de l'huile de soja.....	221
Figure 8-7 : Fiche de mesure des composés polaires totaux par la méthode PCT 120 3M	222
Figure 8-8 : Courbes de cinétiques de viscosité des huiles neuves (a, b et c) et vieilles (d, e et f) frial, de soja et de palme raffinée oléine en fonction de la température	223
Figure 8-9 : Observation au microscope électronique à balayage (MET) de la structure de la banane plantain avant friture.	226
Figure 8-10 : Observation au microscope électronique à balayage (MET) de la structure de la banane plantain après friture.....	227

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Classification et répartition géographique des principales variétés (<i>Bakry et al.</i> , 2005).....	25
Tableau 2-2: La composition chimique et les caractéristiques biochimiques de plantain à différents stades physiologiques pour 100 g de poids frais (<i>Aurore et al.</i> , 2009).....	29
Tableau 2-3 : Production mondiale annuelle (2009/2010) d'huiles végétales en millions de tonnes (USDA, Foreign Agriculture Service) (<i>Claude</i> , 2013).	33
Tableau 2-4 : Principaux acides gras saturés, monoinsaturés et polyinsaturés ainsi que leurs sources (<i>Linder</i> , 2003).....	36
Tableau 2-5: caractéristiques des différents types de friture (<i>Graille</i> , 1998).....	40
Tableau 2-6 : Valeurs des coefficients de chaleur par convection durant le procédé de friture	51
Tableau 2-7: Situation de la réglementation française et européenne (<i>Olle</i> , 1998).....	69
Tableau 3-1 : Application des matrices pour optimiser des paramètres et/ou un procédé : cas de la friture profonde (a).....	74
Tableau 3-2 : Application des matrices pour optimiser des paramètres et/ou un procédé : cas de la friture profonde (b).....	75
Tableau 4-1: Domaine expérimental et niveaux des facteurs retenus pour l'optimisation du procédé de friture profonde de plantain	80
Tableau 4-2 : Plan d'expérimentations généré selon la matrice de Doelhart.....	81
Tableau 5-1 : Composition initiale en acides gras des différentes huiles utilisées.....	96
Tableau 5-2 : Propriétés physicochimiques initiales des huiles de friture utilisées	98
Tableau 5-3 : Composition physicochimique de la banane plantain	100
Tableau 5-4 : Caractéristiques morphologiques de la banane plantain.....	102
Tableau 5-5 : paramètres d'analyse thermique différentielle de l'amidon de la banane plantain mûre.....	103
Tableau 5-6 : Expérimentations générées par la matrice de Doehlert et réponses obtenues concernant la friture du plantain dans l'huile Frial.	106
Tableau 5-7: Coefficients de régression multiple et du modèle polynomial quadratique pour les effets principaux et les interactions entre les différents facteurs étudiés pour les réponses : teneur en eau, teneur en lipides, dureté et couleur de la banane plantain après friture dans l'huile Frial.....	107

Tableau 5-8 : Matrice de Doehlert et réponses obtenues après friture de la banane plantain dans l'huile de soja.....	117
Tableau 5-9: Coefficients du modèle polynomial quadratique pour les effets principaux et les interactions entre les différents facteurs étudiés pour les réponses teneur en eau, teneur en lipides, dureté et couleur après friture dans l'huile de soja.....	118
Tableau 5-10 : Variation des acides gras de l'huile Frial et de soja au cours de 10 jours de friture consécutifs.....	127
Tableau 5-11 : Variation des acides gras de l'HPRO après 10 jours de friture consécutifs	128
Tableau 5-12 : Teneurs en composés polaires totaux mesurées par trois méthodes et mesure de la viscosité après friture de la banane plantain.....	130
Tableau 5-13 : Indices chimiques des huiles Frial, soja et palme raffinée oléine au cours de la friture profonde.....	138
Tableau 5-14 : Mesure des diènes et triènes conjugués au cours de la friture de la banane plantain.....	140
Tableau 5-15 : Analyse calorimétrique, mesurée par analyse thermique différentielle des différentes huiles utilisées au cours de la friture profonde de banane plantain.....	142
Tableau 5-16 : Mesure du temps d'induction à l'oxydation des différentes huiles par analyse thermique différentielle.....	147
Tableau 5-17 : Mesures des paramètres L^* , a^* , b^* des huiles Frial, de soja et de palme raffinée oléine en fonction de la durée de la friture profonde	149
Tableau 5-18 : Evolution de la couleur de la banane plantain en fonction du vieillissement des huiles au cours du procédé de friture profonde.....	152
Tableau 5-19 : Variation de la teneur en eau et en huile de la banane plantain	153
Tableau 5-20 : Profil de texture des tranches de banane plantain	154
Tableau 5-21 : Teneur en eau et perte de masse initiales et finales de la banane plantain	159
Tableau 5-22 : Pourcentage des teneurs en huile (en base sèche) expérimentales et calculées au cours de la cinétique de friture	164
Tableau 5-23 : Estimation des coefficients des paramètres des équations empiriques.....	168
Tableau 5-24 : Pourcentage des teneurs en huile expérimentales (sur base sèche) et calculées au cours de la cinétique de friture	170
Tableau 8-1: Evaluation sensorielle de la banane plantain frite à l'huile Frial.	225

Liste des équations

Équation 2-1	60
Équation 2-2	60
Équation 2-3	61
Équation 2-4	61
Équation 2-5	61
Équation 3-1	73
Équation 4-1	79
Équation 4-2	80
Équation 4-3	83
Équation 4-4	83
Équation 4-5	84
Équation 4-6	85
Équation 4-7	86
Équation 4-8	86
Équation 4-9	87
Équation 4-10	88
Équation 4-11	88
Équation 4-12	88
Équation 4-13	91
Équation 5-1	161
Équation 5-2	162
Équation 5-3	162
Équation 5-4	162
Équation 5-5	162
Équation 5-6	162

Équation 5-7	166
Équation 5-8	167
Équation 5-9	167
Équation 5-10	167

ABREVIATIONS

Anon : anonyme

AGL : acide gras libre

AG : acide gras

AGMI : acide gras monoinsaturé

AGS : acide gras saturé

AGI : acide gras insaturé

AGPI : acide gras polyinsaturé

AGT : acide gras trans

ApoB : apolipoprotéine B

ApoA : apolipoprotéine A

b.h : base humide

°C : degré Celsius

CPT : composés polaires totaux

C : pourcentage d'AGI

DHA : acide docosahexaénoïque

DG : diglycérides

d : épaisseur

DSC : analyse calorimétrique différentielle

ΔE : différence de couleur

EPA : acide eicosapentaénoïque

FAO : organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

g : gramme

HDL : lipoprotéine de grande densité

HACCP : analyse des dangers-points critiques pour leur maîtrise

HPRO : huile de palme raffinée oléine

IA : indice d'acide

IP : indice de peroxyde

IPa : indice de para anisidine

II : indice d'iode

J/g : joule par gramme

kcal : kilocalorie

KJ : kilojoule

KPa : kilopascal

K : degré Kelvin

KI : iodure de potassium

K_x : constante de vitesse de la cinétique de la teneur en eau en min^{-1}

K_y : constante de vitesse de la cinétique de la teneur en huile en min^{-1}

LDL : lipoprotéine de petite densité

Lp : lipoprotéine

mg : milligramme

MDA : malondialdéhyde ou aldéhyde malonique

meq : milliéquivalent

MEB : microscope électronique à balayage

mPa.s : millipascal seconde

nm: nanomètre

NT : azote total

N : newton

N.mm : newton millimètre

N/mm : newton par millimètre

ox-TG : triglycérides oxydés

ox-TGM : triglycérides oxydés monomères

Pa : pascal

PUFA : poly unsaturated fatty acid ou acide gras poly insaturé

RSM : méthodologie des surfaces de réponse

SEB : Société d'Emboutissage de Bourgogne

TE : teneur en eau

TH : teneur en huile

T : température

t : temps

TGP : triglycérides oligopolymers

TGD : triglycérides dimères

µg : microgramme

µL : microlitre

X : teneur en eau

Xe : teneur en eau à l'équilibre

Y : teneur en huile

Y_{exp} : valeur expérimentale

Y_{calc} : valeur calculée

INTRODUCTION GENERALE

1 INTRODUCTION GENERALE

Le procédé de friture profonde est une méthode très ancienne de préparation des aliments très largement utilisée dans le monde. Il consiste à l'immersion d'un produit alimentaire dans de l'huile ou une graisse chauffée à une température supérieure au point d'ébullition de l'eau, généralement entre 120-180°C (Farkas *et al.*, 1996a). En plus d'être une méthode rapide de cuisson (Bassama *et al.*, 2012), elle confère à l'aliment les propriétés physiques et chimiques uniques désirées par le consommateur. Ces propriétés sont entre autre la modification de la texture par gélatinisation de l'amidon, la dénaturation de protéines, la vaporisation de l'eau, la formation d'une croûte (Mallikarjunan *et al.*, 1997 ; Rimac-Brcic *et al.*, 2004 ; Gazmuri et Bouchon, 2009) où les saveurs et les arômes sont préservés (Singthong et Thongkaew, 2009) une modification de la couleur par brunissement de la surface du produit (Gazmuri et Bouchon, 2009 ; Sothornvit, 2011). Il existe aujourd'hui une gamme de produits frits élaborés à partir de produits différents, comme par exemple les racines, les tubercules, les légumes, les céréales, les produits amylacés (banane, plantain), les viandes, le poisson et le poulet. Habituellement, les huiles partiellement hydrogénées (Krokida *et al.*, 2000a) sont les plus employées parmi lesquelles on peut citer les huiles de palme, de maïs, de coton, soja et tournesol (Sánchez-Gimeno *et al.*, 2008).

En Europe, ce sont les frites de pommes de terre et leurs dérivés qui sont proposés dans les restaurants rapides et sont très appréciés par les consommateurs. En Afrique mais aussi dans les pays d'Amérique latine (Colombie, Equateur, Costa Rica et Porto Rico) (Diaz *et al.*, 1996), on retrouve comme produits de grande consommation les chips de banane plantain (Onyejegbu et Olorunda, 1995 ; Ikoko et Kuri, 2007). La banane plantain est également consommée à un stade de maturité avancé (mûre avec une peau jaune et des taches noires) coupée en dé, appelés couramment « alloko » ou tranches longitudinale (tanjadas) et frit pendant quelques minutes. La qualité et la stabilité de ces produits frits dépendent de nombreux facteurs, telles que la température de l'huile, le temps de friture, le ratio entre poids de l'aliment et volume d'huile de friture, mais également la nature des huiles et de l'aliment à frire.

Le procédé de friture profonde, qui s'opère généralement à haute température et à pression atmosphérique (Mariscal et Bouchon, 2008), peut être à l'origine de transformations non souhaitées et indésirables dans les produits frits, conduisant ainsi à attirer l'attention des communautés scientifiques et industrielles (Rojas-Gonzalez, 2007) dans le cadre de la consommation de ces produit gras.

La friture est également considérée comme une opération de séchage (Sothornvit, 2011) où une partie de l'eau contenu dans l'aliment frit est remplacée par de l'huile (Oliveira *et al.*, 1994 ; Moyano et Berna, 2002 ; Mellema, 2003 ; Duran *et al.* 2007). Cette quantité peut représenter 1/3 du poids total du produit initial (Mellema, 2003) voire 50% du poids total (Pinthus *et al.*, 1993 ; Sothornvit, 2011), en fonction de la nature de l'aliment. C'est le cas des frites françaises qui absorbent de 0,2 à 14% de lipides après friture (Smith *et al.*, 1985) ; (Makinson *et al.*, 1987). Cependant, de nombreux auteurs (Browner *et al.*, 1991 ; Mariscal et Bouchon, 2008) ont mentionné que la consommation excessive de matières grasses, constitue l'une des principales causes d'apparition de maladies coronariennes et de certains cancers. De nombreuses études sur les mécanismes d'absorption des matières grasses au cours du procédé de friture profonde (Aguilera et Gloria-Hernandez, 2000 ; Moyano et Berna, 2002) tentent de limiter la quantité de lipides absorbés dans les produits frits (Moreira et Barrufet, 1998 ; Ni et Datta, 1999 ; Debnath *et al.*, 2009; Singthong et Thongkaew, 2009), et tentent de développer de nouvelles technologies (Bouchon *et al.*, 2003; Moyano et Pedreschi, 2006).

Outre l'absorption d'huile dans le produit frit, les huiles de friture peuvent subir des altérations par des phénomènes d'oxydation, de polymérisation, voire d'hydrolyse lorsqu'elles sont utilisées trop longtemps, conduisant à la production des nouveaux composés complexes (acides gras libres, hydroperoxydes, composés polaires totaux, acides gras *trans*, ...) qui affectent l'acceptabilité (goût, odeur et couleur) du produit et qui sont potentiellement considérés comme toxiques. On note aussi la perte de certains composés d'intérêt nutritionnel tels que les minéraux et les vitamines hydrosolubles entraînés vers l'extérieur du produit par diffusion. Afin de garantir la sécurité sanitaire, les législations européenne et française ont établi des critères de qualité en limitant la formation des composés polaires à 25%, produits de dégradation potentiellement toxiques.

Au cours de la friture profonde, il se déroule un double transfert de masse en sens opposé (eau et huile) et un transfert de chaleur entre le milieu de friture et l'aliment.

De nombreuses études ont été menées au niveau du phénomène de diffusion de l'huile (Gamble *et al.*, 1987 ; Baumann et Escher, 1995 ; Ufheil et Escher, 1996) dans la pomme de terre (Ashkenazi *et al.*, 1984; Gamble *et al.*, 1987b ; Moreira et Bakker-Arkema, 1989) mais aussi dans d'autres produits comme les boulettes de viande (Ateba et Mittal, 1994), les chips de tortilla (Moreira *et al.*, 1995), le *tofu* (Baik et Mittal, 2005), la pâte à beignet (Budzaki et Seruga, 2005).

Au regard de tout ce qui a été évoqué préalablement, des hypothèses peuvent être émises. Lors de l'élaboration des produits frits, les transferts de matière et/ou de chaleur qui ont lieu au cours de la friture profonde peuvent :

- Transformer la matrice alimentaire en combinant différentes modifications physicochimiques souhaitées (déshydratation et cuisson, gélatinisation de l'amidon, dénaturation des protéines, aromatisation et coloration *via* les réactions de Maillard et l'absorption de l'huile) (Courtois *et al.*, 2012).
- Diffusion vers l'extérieur du produit de molécules reconnues d'intérêt nutritionnel (vitamines hydrosolubles, minéraux...) et de l'eau. Inversement, l'huile ainsi que les composés contenus dans celle-ci (caroténoïdes, vitamines,...) pénétreront dans la matrice alimentaire.
- Générer la formation de produits d'altération (Combe et Rossignol-Castera, 2010) indésirables, volatils ou non, modifiant ainsi les caractéristiques physico-chimiques et nutritionnelles des huiles ainsi que celles de l'aliment.

Tenant compte de l'intérêt que représente une alimentation équilibrée, l'objectif de ce travail consiste à étudier le procédé de friture profonde appliqué à la banane plantain, compte tenu de l'importance économique de cette matrice alimentaire largement consommées au Congo (86 000 tonnes, suivant les estimations de la FAO en 2013). Dans un premier temps, l'étude portera sur la modélisation empirique du procédé permettant de déterminer l'influence des paramètres de cuisson profonde (temps / température / quantité). Les conditions optimales de friture de la banane plantain mûre obtenue sont ensuite réitérées dans le cas de la cuisson avec de l'huile de soja et de l'huile de palme raffinée. Dans une seconde partie, les travaux se poursuivent par l'étude de la stabilité des différentes huiles (Frial, soja et palme) en fonction de la quantité de plantain frit, afin d'évaluer leur comportement au vieillissement. L'évaluation de différents paramètres physicochimiques (acidité, apparition de composés d'oxydation primaires et secondaires, couleur, viscosité dynamique, composition en acides gras, profil thermique) et de la qualité physico-chimique des produits frits (teneur en huile, humidité, protéines, modification des amidons, texture...) sont étudiés.

Le troisième objectif de ce travail a consisté à étudier la relation entre les phénomènes d'absorption huile et perte en eau, en fonction des facteurs température, temps de friture, épaisseur et nature de l'huile. Un modèle de cinétique a permis d'obtenir des valeurs théoriques et modéliser les phénomènes de transfert (perte en eau et absorption d'huile) dans la matrice au cours du procédé de friture traditionnelle. Ce modèle permettra de mieux comprendre le phénomène de friture profonde de la banane plantain afin de pouvoir adapter au mieux les conditions de cuisson traditionnelle au Congo.

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

2 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Culture mondiale de la banane plantain et des produits amylacés : valeur nutritionnelle et transformation

Dans ce chapitre, nous présentons les caractéristiques générales de la banane plantain (du génome *Musa* AAB, et espèce *paradisiaca* L), ses caractéristiques nutritionnelles (micronutriments), sa valorisation à travers le monde, ainsi que les transformations de produits amylacés ayant subi une opération de friture profonde.

2.1.1 Culture, production et botanique de la banane plantain

Les bananes (*Musa* AAA, AA), les plantains (*Musa* AAB), et les autres bananes à cuire (*Musa* AAB, ABB) constituent l'une des principales ressources alimentaires dans le monde (Emaga *et al.*, 2008). Suivant le document « Rapports des pays en 2001 », le bananier plantain est par ailleurs, généralement cultivé en association avec d'autres cultures vivrières (manioc, igname, riz, taro, macabo, etc.), de rente (café, cacao) ou fruitières (avocatier, agrumes, prunier, etc.).

En termes de production mondiale, la banane est le quatrième produit agricole plus important pour l'alimentation humaine après le riz, le blé et le maïs (Bakry *et al.*, 1997; Lassoudière, 2007).

En 2013, La production mondiale a avoisinée 37 millions de tonnes (estimation FAO). Selon Bakry *et al.*, (1997), les bananiers sont cultivés dans plus de 120 pays sur les 5 continents du monde et sur plus de 10 millions d'hectares (Lassoudière, 2007). Récemment, la FAO a recensé une production mondiale de l'ordre de 90 millions de tonnes, principalement dans les régions tropicales de l'Afrique (13%), de l'Amérique centrale et de l'Amérique du Sud (28%). Ces données comprennent les Caraïbes et l'Asie du Sud et Sud-Est (47% ; FAOSTAT, 2010).

En Afrique, les principaux producteurs sont l'Ouganda et le Cameroun (FAO, 2004 ; Emaga *et al.*, 2008). Par ailleurs, il existe d'autres pays grands producteurs et exportateurs en dehors des pays de l'Afrique. Ce sont l'Equateur, la Colombie, le Costa-Rica et les Philippines (Bakry *et al.*, 1997).

Les bananiers appartiennent à l'ordre des zingibérales et à la famille des Musaceae (Lassois *et al.* 2009). Ces derniers comportent trois genres, à savoir :

- *Musella*, très peu représenté et localisé en Asie,

- *Ensete*, ne comportant pas d'espèces parthénocarpiques,
- *Musa*, présentant une forte variabilité et caractérisée par des inflorescences avec des bractées insérées séparément des fleurs, à l'inverse du genre *Ensete*.

Le genre *Musa* a été divisé en quatre sections (Cheesman, 1947 ; Heslop-Harrison et Schwarzacher, 2007, cité par Lassois et al., 2009 sur la base du nombre de chromosomes et de caractéristiques morphologiques. Ce sont : les *Callimusa* (n = 10) ; les *Rhodochlamys* (n = 11) ; les *Australimusa* (n = 10) ; et enfin les *Eumusa* (n = 11) (Lassois et al., 2009). Les deux premières ont un usage ornemental. Les *Australimusa* contiennent des espèces sauvages parfois cultivées pour la fibre (*Musa Textilis*) comme aux Philippines et des variétés cultivées pour leur fruit, les Feis, présents uniquement dans le Pacifique.

Les *Eumusa* sont à l'origine de la majorité des bananiers cultivés dans le monde pour leur fruit. Il existe des variétés sauvages diploïdes et fertiles et de nombreuses variétés cultivées, triploïdes et stériles.

La banane plantain *Musa* AAB variété «Harton» du type faux corne, est une triploïde appartenant à la famille des musacées de la section *Eumusa* et issue du croisement interspécifiques entre les principales espèces séminifères sauvages diploïdes le genre *Musa* *acuminata* (donneur de deux génomes A) et *Musa balbisiana* (donneur d'un génome B) comme l'indique la **figure 2-1**.

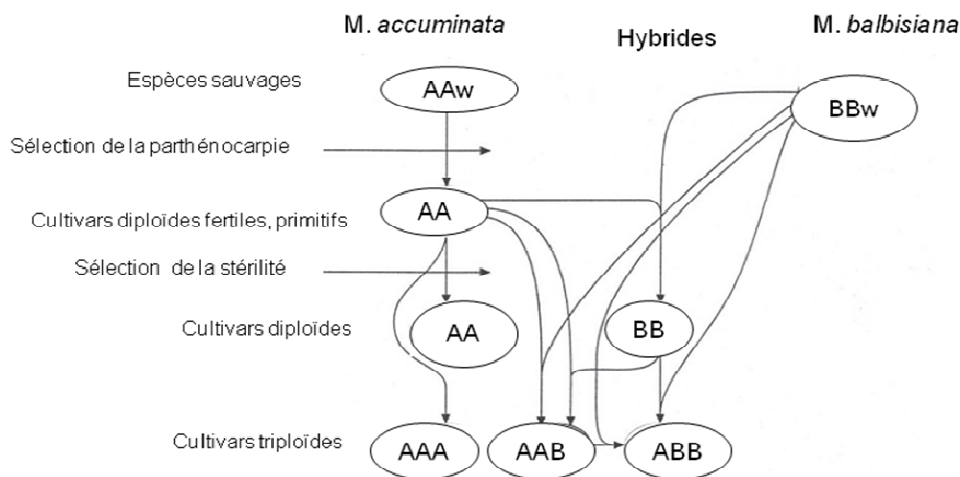


Figure 2-1 : Évolution des principaux groupes génomiques de la série *Eumusa* (Jones, 2000) cité par Lassois et al., 2009.

Il existe plusieurs espèces et variétés (tableau 2-1), largement répandues et consommées en Afrique, en Amérique latine et en Asie (Chandler, 1995 ; Onyejegbu et Olorunda, 1995 ; Totte et al., 1996 ; Diaz, 1997 ; Rojas-Gonzalez, 2007).

Tableau 2-1 : Classification et répartition géographique des principales variétés (*Bakry et al.*, 2005).

Groupe	Sous groupe	Cultivars	Type de fruit	Distribution
AA	Sucrier	Pisang Mas/Frayssinette/Figue Sucrée	Dessert-sucré	tous les continents
		Pisang Lilin	Dessert	Indonésie/Malaisie
		Pisang Berangan/Lakatan	Dessert	Indonésie/Malaisie/Philippines
AAA	Cavendish	Lacatan/Poyo/Williams/Grande Naine/Petite Naine	Dessert	tous les continents, pays exportateurs
	Gros-Michel Figue-Rose Lujugira	Gros-Michel/Highgate/Cocos	Dessert	tous les continents
		Figue-Rose rose/Figue-Rose verte	Dessert	tous les continents
		Intuntu/Mujuba	à bière/à cuire	Afrique de l'Est et centrale, Colombie
	Ibota	Yangambi km5	Dessert	Indonésie/Afrique
AB	Ney Poovan	Safet Velchi/Sukari	Dessert-acidulé	Inde/Afrique de l'Est
AAB	Figue-Pomme	Maçà/Silk	Dessert-acidulé	tous continents
	Pome	Prata	Dessert-acidulé	Inde/Malaisie/Australie/Afrique de l'Ouest/Brésil
	Mysore	Pisang Ceylan	Dessert-acidulé	Inde
	Pisang Kelat	Pisang Kelat	Dessert	Inde/Malaisie
	Pisang Rajah	Pisang Rajah Bulu	à cuire	Malaisie/Indonésie
	Plantain	French/Corne/Faux Corne	à cuire	Afrique Centrale et de l'Ouest/Amérique Latine/Caribbes
	Popoulou	Popoulou	à cuire	Pacifique
	Laknao	Laknao	à cuire	Philippines
	Pisang Nangka	Pisang Nangka	à cuire	Malaisie
ABB	Bluggoe	Bluggoe/Matavia/Poteau/Cacambou	à cuire	tous les continents
	Pelipita	Pelipita	à cuire	Philippines/Amérique Latine
	Pisang Awak	Fougamou	Dessert	Inde/Thaïlande/Philippines/Afrique de l'Est
	Peyan		à cuire	Philippines/Thaïlande
	Saba	Saba	à cuire	Philippines/Indonésie/Malaisie

Maturation (Emaga et al., 2008)

Les stades de maturation des bananes et des plantains couramment comestibles sont déterminés à partir de différentes caractéristiques du fruit : la couleur de la peau et de la pulpe, la fermeté de la pulpe, l'extrait sec soluble, le taux d'humidité et la teneur en matière sèche. Van Loesecke (1950) a classifié la maturation de ces fruits en huit stades liés à la couleur de la peau. Généralement dans le commerce, sept stades de maturation sont déterminés visuellement (Li et al., 1997) (**Figure 2-2**).



2-Vert clair



3-Vert avec des points jaunes



4-Plus vert que jaune



5-Plus jaune que vert



6-Entièrement jaune



7- Jaune avec des points noirs

Figure 2-2 : Stades de maturation des fruits du bananier, échelle de 2 à 7

2.1.2 Transformation de la banane plantain et d'autres produits frits amylacés

2.1.2.1 La banane plantain

La banane plantain se consomme aussi bien verte que mûre. Elle est préparée selon des recettes différentes dans les diverses régions du monde. Elle peut y être consommée sous forme de fruit frais, de légume cuit ou utilisée pour la fabrication de produits transformés (chips, farine,...) et de boissons alcoolisées (bière en Afrique de l'Est) (Bakry *et al.*, 2005). La transformation industrielle ne représente cependant qu'un très faible pourcentage de la production

Dans toute l'Amérique du Sud, de petites entreprises produisent une gamme de produits transformés à base de banane plantain, les chips les plus populaires appelés «tostones» ou «patacones» ainsi que les frites de banane appelées «tajadas». Les «tostones» sont préparées à partir de tranches de bananes plantain épluchées, mûres mais vertes. Le fruit est frit dans l'huile végétale pendant quelques minutes, puis placé sur une surface plate, puis pressé. Les tranches pressées sont frites une deuxième fois dans la même huile.

Les «tajadas» sont préparées à l'issue d'une seule friture profonde des tranches de bananes plantain mûres ou vertes découpées dans le sens longitudinal (ovoïde allongé) soit dans le sens radial (cylindre).

En Afrique, le plantain est transformé à la fois vert ou mûr et consommé, globalement, de la même manière qu'en Amérique Latine. En Côte d'Ivoire, les aliments issus des transformations de la banane plantain sont généralement désignés par des appellations dont la plus connue est l'«alloko» qui est de la banane plantain mûre (stade de maturité 5 à 7) frite. L'Afrique centrale réalise également ce même genre de mets, généralement considéré comme produit de base. Toutes ces transformations sont réalisées au niveau domestique mais aussi à l'échelle industrielle (Totte, 1994 ; Thompson, 1995 ; Rojas-Gonzalez, 2007).

2.1.2.2 La patate douce

La patate douce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) est depuis longtemps considérée comme une source de calories à prix abordable pouvant servir à parer la famine.

Selon la FAO (FAOSTAT, 2010), en chiffres de production (106 millions), la patate douce ne figure pas parmi les cultures alimentaires les plus importantes d'Afrique. En ce qui concerne les chiffres de consommation, elle a dans certains pays de l'Afrique de l'Est une importance

énorme, qui dépasse son importance relative en Chine d'un facteur de 2 à 3 et qui est comparable au rôle du manioc dans l'alimentation des pays appartenant à la zone africaine. Comme dans les autres régions tropicales, la patate douce est avant tout consommée en Afrique sous forme de tubercules frais (bouillis, frits, cuits sous la cendre, etc.). Les «frites de patate douce» sont préparées à partir de tranches de tubercules frais épluchés, découpés en fines et grosses tranches ou bâtonnets. Ils sont ensuite frits dans l'huile végétale pendant quelques minutes, puis égouttés.

Certains restaurants de la côte Est des États-Unis, notamment à New York et en Floride, offrent maintenant des frites de patate douce, préparées sur place avec les types boniato ou Jersey (Adam, 2005).

2.1.2.3 La pomme de terre

La pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) occupe actuellement la quatrième place dans l'alimentation humaine après le blé, le maïs et le riz (Contamine, 2008 ; M'Hamdi *et al.*, 2003). Depuis, ce tubercule est cultivé dans le monde entier et consommé de multiples façons. Vendues à l'état frais, les pommes de terre sont également transformées par l'industrie agro-alimentaire (frites, purée...).

Les quantités de pommes de terre destinées à la transformation industrielle n'ont pas cessé d'augmenter, grâce à la forte diversification des produits finaux. A l'origine, dans les années 1960, cette transformation pour l'alimentation humaine concernait principalement la déshydratation et la confection de chips. A partir de 1970, elle se diversifie et augmente en volume, tant pour les produits déshydratés que pour les chips. Dans les années 1980, la progression et la diversification sont encore plus marquées grâce à l'implantation, dans la région Nord-Pas-de-Calais, de deux usines de fabrication de frites surgelées. A ces catégories viennent maintenant s'ajouter les produits plus élaborés, dits de "*quatrième gamme*", comme les gratins surgelés, les galettes, les pommes dauphine, noisette, etc (Wünsch, 2004).

2.1.3 Valeur nutritionnelle du plantain

En tant que culture vivrière, les bananiers et le plantain sont particulièrement importants car ils produisent un aliment de bonne qualité nutritionnelle et s'adaptent à des systèmes de

culture très variés. Le **tableau 2-2**, montre la composition de la banane plantain à différent stade de maturité.

Tableau 2-2: La composition chimique et les caractéristiques biochimiques de plantain à différents stades physiologiques pour 100 g de poids frais (Aurore *et al.*, 2009)

Composants	Unités	Plantain vert ⁽¹⁾	Pulpe mûre
Energie	Kcal	91	122 ⁽³⁾
Eau	g	63	65 ⁽³⁾
Protéine	g	0,8	1,3 ⁽³⁾
Lipides totaux	g	0,1	0,37 ⁽³⁾
Hydrate de carbone	g	24,3	32 ⁽³⁾
Fibre	g	5,4	2,0-3,4 ⁽³⁾
Sodium (Na)	mg		4,0 ⁽³⁾
Potassium (K)	mg		500 ⁽³⁾
Calcium (Ca)	mg	7	30 ⁽³⁾
Magnesium (Mg)	mg	33	35 ⁽³⁾
Phosphore (P)	mg	35	30 ⁽³⁾
Fer (Fe)	mg	0,5	0,6 ⁽³⁾
Cuivre (Cu)	mg	0,16	
Zinc (Zn)	mg	0,1	
Manganese (Mn)	mg	15	
β-carotene	μg	0,03-1,20	390-1035 ⁽²⁾
Vitamine C	mg	20	20 ⁽²⁾
Thiamine (B ₁)	mg	0,05	0,08 ⁽²⁾
Riboflavin (B ₂)	mg	0,05	0,04 ⁽²⁾
Niacin (B ₃)	mg	0,7	0,6 ⁽²⁾
Acide panthoténique (B ₅)	mg	0,37	
Vitamine B ₆	Mg	traces	
Acide folique total (B ₉)	μg	0,016	
Serotonine	mg	45	76 ⁽¹⁾
Biotine (B ₈)	μg	traces	

Source:

⁽¹⁾ (Marriott et Lancaster, 1983)

⁽²⁾ (Woolfe, 1992)

⁽³⁾ (Lassoudière, 2007)

2.1.3.1 Les hydrates de carbones ou sucres totaux

La banane plantain se caractérise par une teneur très élevée en glucides : 24,3 g pour le plantain vert (Aurore *et al.*, 2009) et 32 g pour le plantain mûr (Lassoudière, 2007) pour 100 g. Une teneur nettement supérieure à celle de la banane douce (20,5 g de glucides), et bien

sûr à celle des fruits frais (qui avoisine en général 9 à 12 g). Même dans un tubercule comme la pomme de terre, les glucides ne dépassent pas 19 à 20 g aux 100 g (Anon, 2013) Mais elle est inférieure à celle du manioc qui est 35 g dont 20-25% d'amidon pour 100 g de produit (Onwueme, 1978).

L'amidon est le composé le plus important de la pulpe des fruits du bananier à l'état vert de maturation (Aurore *et al.*, 2009). La composition des bananes desserts, des plantains et des autres bananes à cuire change de manière importante au cours de la maturation. La dégradation de l'amidon est le phénomène principal lié à la maturation de la banane (Emaga *et al.*, 2008) avec une augmentation de la teneur en saccharose (sucre non réducteur) et accumulation du glucose et du fructose (sucres réducteurs).

Dans les végétaux frais mûrs, on ne retrouve de l'amidon qu'à l'état de trace, exception faite de la châtaigne, des légumineuses (fève, haricot en grains) et de la pomme de terre, qui en contiennent en quantité non négligeable (80 à 90 % des glucides totaux). La banane mûre (peau jaune, sans trace verte) n'en contient qu'en faible quantité (moins de 1%) (Liégeois, 2001).

Les glucides de la banane plantain sont constitués essentiellement d'amidon, d'où la nécessité de cuire cet aliment avant de le consommer. Avant cuisson, 66 % de l'amidon de la banane plantain résiste à l'amylase pancréatique (l'enzyme de l'organisme capable de scinder la molécule d'amidon en plus petites particules). Après cuisson, la transformation de l'amidon par l'amylase est complète. Par contre, si on attend le refroidissement de la banane plantain, 10 % de l'amidon résiste à l'action de l'amylase (Anon, 2013). Pour une meilleure digestibilité, il est donc préférable de consommer la banane plantain rapidement après cuisson. Dans la banane plantain, ce sont les glucides qui fournissent l'essentiel du total énergétique. Ainsi, le plantain peut procurer, lors de sa consommation, entre 420 à 570 kJ pour 100 g de pulpe (base humide) ou autour de 1120 kJ pour 100 g quand le plantain est frit (Chandler, 1995 ; Rojas, 2007).

2.1.3.2 Les minéraux

Les minéraux de la banane plantain sont variés, et leurs teneurs proches de celles de la banane douce : le potassium domine (500 mg), suivi par le phosphore (30-35 mg) et le magnésium (33-35 mg), enfin le calcium (3-7 mg) et le sodium (4 mg). Dans la banane plantain on retrouve aussi différents oligo-éléments comme le fer, le zinc et cuivre.

La teneur en potassium pour ce fruit est remarquable lorsque que l'on connaît son importance dans la régulation du pH du sang et la stimulation de la production d'acide chlorhydrique par l'estomac, favorisant ainsi la digestion (Chandler, 1995). De plus, il facilite la contraction des muscles, incluant le cœur, et participe à la transmission de l'influx nerveux.

2.1.3.3 Les vitamines

Les végétaux frais contiennent en général un éventail très large de vitamines. De part sa composition, la banane plantain contribue également à un apport vitaminique dans l'alimentation. Elle dispose en majorité de vitamines hydrosolubles et d'une vitamine liposoluble (vitamine A). Les caroténoïdes, la vitamine C sont présents en quantité élevées comparées à d'autres qui sont en comparé aux quantités infimes retrouvées pour les vitamines E (tocophérol), B1 (thiamine), B2 (riboflavine), B3 (niacine), B5 (acide pantothénique), B6, B9 (acide folique) (voir tableau 3.1-2) (Aurore *et al.*, 2009).

Le plantain contient en moyenne près de 20 mg d'acide ascorbique ou vitamine C (Woolfe, 1992 ; Rojas, 2007 ; Aurore *et al.*, 2009) pour 100 g de produit (base humide). La teneur en caroténoïdes, essentiellement en β -caroténoïdes dans le plantain est comprise entre 0,03-1,20 μ g (Marriott et Lancaster, 1983) et 309-1035 μ g (Woolfe, 1992) pour 100 g de pulpe verte et mûre respectivement.

Pour les vitamines du groupe B, bien représentées, on peut faire des observations comparables : leurs proportions ne changent pratiquement pas après maturité et n'excèdent pas 0,1 mg.

2.1.3.4 Autres composants

Comme dans la plupart des végétaux frais, les protéines y sont en effet peu abondantes (1 %), de même que les lipides ou matières grasses, qui ne dépassent pas 0,2 %. Mais ces valeurs sont susceptibles de varier selon les variétés, la saison, le degré de maturité, les conditions de culture, etc. Pour exemple, le plantain mûr présente des teneurs en protéines et huile allant jusqu'à 0,37 g et 1,3 g respectivement (Lassoudière, 2007, cité par Aurore *et al.*, 2009).

Les fibres de la banane plantain verte à maturité atteignent 5,4 g pour 100 g (Aurore *et al.*, 2009), et représentent un taux plus élevé que dans la plupart des fruits. Au cours de la

maturité (plantain mûr), les fibres baissent entre 2-3,4 g (Lassoudière, 2007). Ces dernières contribuent à donner une texture assez dense au fruit et interviennent dans le métabolisme des glucides pour rendre leur assimilation plus progressive encore.

Quantitativement, l'eau est le constituant le plus important des fruits et légumes. Les végétaux en contiennent en effet entre 75 et 96 %. La banane plantain, végétal amylacé n'en contient que 63 à 67%. Elle varie peu lors de la maturation (Offem et Thomas, 1993 ; John et Marchal, 1995 ; Rojas, 2007).

2.2 LES HUILES VEGETALES UTILISEES DANS LES PROCEDES DE FRITURE PROFONDE

2.2.1 Généralités sur les huiles végétales alimentaires

Les huiles et graisses végétales sont des substances obtenues à partir de graines, amandes ou fruits dits « oléagineux ». En fait, toutes les amandes et graines et tous les fruits contiennent de l'huile, mais seuls, sont appelés « oléagineux » les produits cultivés qui servent à une production industrielle de l'huile (Vaitilingon, 2007).

Dans les plantes en général, l'huile est contenue dans la substance dure et ligneuse des graines ou du noyau et se trouve enfermée dans les cellules oléifères sous forme de petites gouttes à l'exception des huiles d'olive et de palme contenues dans une enveloppe charnue du fruit. Quant aux graisses animales, elles sont dans les cellules formant les tissus adipeux. Et celles-ci sont extraites soit par pressage ou par solvant.

2.2.2 Productions d'huiles

Au cours des trente dernières années, le marché international des huiles végétales a connu un développement considérable, qu'il s'agisse de la production ou des échanges mondiaux. Dans cet ensemble, trois huiles tropicales : le coco, le palmiste et surtout le palme, et trois pays : l'Indonésie, la Malaisie et à un moindre degré les Philippines, ont joué un rôle déterminant pour l'approvisionnement en matières grasses végétales de la plus grande partie du monde.

En 2007/2008 (Dronne et Forslund, 2009) la production mondiale des 8 principales huiles végétales (arachide, colza, coprah/coco, coton, palme, palmiste, soja, tournesol, colza) a atteint environ 125 millions de tonnes (Mt) dont près de 50 Mt pour les trois huiles tropicales

majeures (palme, palmiste, coco). En 2009/2010, la production des huiles végétales est passée à 144 millions de tonnes avec comme production la plus élevée l'huile de palme (Claude, 2013). Le tableau ci-dessous donne une indication sur la production annuelle d'huiles végétales où celles-ci sont séparées en groupe par rapport au tonnage.

Tableau 2-3 : Production mondiale annuelle (2009/2010) d'huiles végétales en millions de tonnes (USDA, Foreign Agriculture Service) (Claude, 2013).

Groupe 1		Groupe 2		Groupe 3	
Palme	45,9	Coton	4,6	Sésame	0,8
Soja	38,8	Palmiste	5,5	Lin	0,7
Colza	22,5	Arachide	4,6		
Tournesol	11,6	Olive	3,0		
		Coprah	3,6		
		Maïs	2,3		

Rappelons que les huiles et graisses alimentaires sont subdivisées selon les principales classes suivantes (Cossut *et al.*, 2001-2002):

- Huiles végétales fluides : elles comprennent les huiles d'arachide, de colza, de germes de maïs, de tournesol, de soja, d'olive, de noix, de pépins de raisin...
- Huiles végétales concrètes (ou graisses solides) : elles comprennent les huiles de coprah (provenant de la noix de coco), de palme et de palmiste...
- Huiles et graisses animales : on distingue parmi elles, celle d'origine
 - ✓ Maritime : graisses et huiles de mammifères marins (baleine, cachalot) et de poissons (sardine, hareng...)
 - ✓ Terrestre : graisse de mouton, de boeuf (suif), de cheval, de porc (saindoux), d'oie.
- Corps gras élaborés :
 - ✓ le beurre d'origine animale
 - ✓ les margarines d'origine végétale

Il existe une grande différence entre une huile et une graisse. Cela se caractérise par le point de fusion : les huiles sont liquides à température ambiante (25°C) alors que les graisses restent solides à cette même température (Jeantet *et al.*, 2006).

En friture, les huiles ayant subies un raffinage sont largement utilisées (Krokida *et al.*, 2000a) de même que celles partiellement hydrogénées car de nombreux auteurs (Melton *et al.*, 1993 ; Hawrysh *et al.*, 1995) les qualifient « moins sensibles » à l'oxydation.

2.2.3 Composition des huiles alimentaires

Un corps gras (huile ou graisse) est composé d'une grande variété de constituants. Les triacylglycérols sont très largement majoritaires (95-99%) : ils sont composés de glycérol (3-5%) et d'acides gras (90-95%). D'autres constituants sont naturellement présents en plus faible quantité : des lipides polaires tels que les phospholipides (0,1 - 0,2 %) et des composés dits insaponifiables appartenant à une fraction non glycéridique (0,1 à 3%) principalement représentés par les stérols et les tocophérols et tocotriénols. Cette fraction contient également des caroténoïdes, des alcools terpéniques, du squalène et des composés phénoliques (Morin et Pagès-Xatart-Parès, 2012).

2.2.4 Les acides gras

Selon leurs compositions en acides gras (Dubois *et al.*, 2008), les corps gras d'origine végétale (huiles, graisses, beurres végétaux) peuvent être classés en quatre groupes (Morin et Pagès-Xatart-Parès, 2012).

Les acides gras sont les constituants élémentaires des lipides. Ils sont composés d'une chaîne hydrocarbonée comportant à une extrémité un groupement méthyle CH_3 et à l'autre extrémité un groupement carboxylique COOH . Représentant à peu près 95% de la masse des acylglycérols, les acides gras eux-mêmes se distinguent par leur longueur de chaîne (nombre d'atomes de carbone), leur nombre de doubles liaisons (aucune pour les AGS, une pour les AGMI, de deux ou plus pour les AGPI) et la position sur la chaîne hydrocarbonée et la configuration spatiale (ou géométrie) de ces insaturations (isomères *cis*, *trans*).

Les principaux acides gras sont couramment désignés par des noms usuels qui s'appliquent aux isomères présents à l'état naturel ainsi qu'à quelques dérivés bien connus (**Tableau 2-4**). Différentes nomenclatures sont en usage pour désigner le nombre et la position des doubles liaisons. La nomenclature chimique fait appel à une numérotation à partir du

carboxyle terminal (carbone 1) vers le groupement méthyle (carbone n). La double liaison est indiquée par le symbole Δ suivi d'un chiffre correspondant au premier atome de carbone participant à la double liaison. La nomenclature biochimique (n – x) ou « oméga », en référence à une fonction physiologique et aux précurseurs, tient compte de la première double liaison en partant du groupement méthyle terminal.

2.2.4.1 Les acides gras saturés

Les acides gras saturés (AGS) avec leurs principaux représentants (C12:0, C16:0, C18:0) sont présents en quantité moyenne à forte : Il s'agit par exemple des huiles de palmiste, de coprah et de babassu riches en acide laurique (C12:0), des huiles de palme et de buriti riches en C16:0 et du beurre ou du karité, riche en C18:0. Ces huiles ont un indice d'iode compris entre 5 et 50 g de I₂/100g.

Les acides gras saturés sont ceux dont toutes les liaisons carbones disponibles sont occupées par un atome d'hydrogène. Ils ne rancissent pas, mêmes réchauffés pour la cuisson. Ils sont linéaires et se compactent facilement pour former une masse solide ou semi solide à la température ambiante (Nanji *et al.*, 1995).

Les acides gras saturés (AGS) sont synthétisés par l'organisme humain. Avec les acides gras apportés par l'alimentation, ils constituent la partie des acides gras estérifiés sur des phospholipides (riches en acide stéarique C18:0), des sphingolipides, et des triacylglycérols de réserve. Ils assurent une part importante de la dépense énergétique. Ils sont en partie convertis par désaturation en acides gras mono-insaturés (Legrand, 2007).

2.2.4.2 Les acides gras insaturés

On distingue les acides gras monoinsaturés et polyinsaturés. Les AGMI possèdent une double liaison. Ils présentent des courbures et des angulations et ne se compactent pas facilement. Ils restent liquides à température ambiante. Comme les graisses saturées, ils sont relativement stables. Ils ne s'oxydent pas facilement et sont aussi bons pour la cuisson. A la différence des acides gras polyinsaturés essentiels, les acides gras monoinsaturés proviennent d'une part de la synthèse endogène (chez l'homme comme chez quasiment tous les êtres vivants) et d'autre part de l'alimentation. Leur synthèse endogène est réalisée par la $\Delta 9$ désaturase qui introduit une double liaison sur l'acide palmitique et sur l'acide stéarique

conduisant respectivement à l'acide palmitoléique (C16:1 n-7) et à l'acide oléique (C18:1 n-9), pour ce qui concerne les deux principaux (Legrand, 2007).

Les acides gras mono-insaturés se retrouvent principalement dans les huiles d'olive, d'arachide, de noisette ainsi que dans les variétés de tournesol et de colza riches en acide oléique et l'huile de colza (Morin et Pagès-Xatart-Parès, 2012), sésame, jatropha curcas et de ricin (Vaitilingon, 2007). Ces huiles ont un indice d'iode compris entre 50 et 100 g de I₂/100g et sont dites sémi-siccatives.

Les acides gras polyinsaturés (AGPI) possèdent un nombre de doubles liaisons supérieur ou égal à deux. Selon Nanji *et al.* (1995), ces AGPI ne se compactent pas facilement, restent liquides, même réfrigérés, deviennent facilement rances. Les principaux acides gras polyinsaturés sont issus de l'acide oléique par une suite de réactions d'élongation et de désaturation. Ces dernières sont les plus limitantes et certaines sont spécifiques du règne végétal ou du règne animal (Legrand, 2007). On retrouve l'acide linoléique (C18:2 n-6) dans les huiles de soja, de tournesol, de germe de maïs et de pépins de raisin (Morin et Pagès-Xatart-Parès, 2012). Ces huiles ont un indice d'iode compris entre 100 et 150 g de I₂/100g et sont dites sémi-siccatives (Vaitilingon, 2007). L'acide linoléique (C18:3 oméga-3/AGPI) est présent en quantité significative dans les huiles de colza, de soja, de noix et de lin où cet acide gras est majoritaire (Morin et Pagès-Xatart-Parès, 2012).

Tableau 2-4 : Principaux acides gras saturés, monoinsaturés et polyinsaturés ainsi que leurs sources (Linder, 2003).

Acides gras (Formule Simplifiée)	Nom systématique (dénomination chimique)	Nom courant	Principales sources
C4:0	Acide butanoïque	Acide butyrique	Matière grasse laitière Orme
C6:0	Acide hexanoïque	Acide caproïque	
C8:0	Acide octanoïque	Acide caprylique	
C10:0	Acide décanoïque	Acide caprique	
C12:0	Acide dodécanoïque	Acide laurique	
C14:0	Acide tétradécanoïque	Acide myristique	Cannelle, noix de coco, amande de palme et palmier, noix de muscade
C16:0	Acide hexadécanoïque	Acide palmitique	
C18:0	Acide octadécanoïque	Acide stéarique	Poisson, lait, graisses de réserve des animaux d'élevage, huiles végétales

			Beurre de cacao, suif de ruminant
C20:0	Acide eicosanoïque	Acide arachidique	Graine
C22:0	Acide docosanoïque	Acide béhénique	
C24:0	Acide tétracosanoïque	Acide lignocérique	
C26:0	Acide hexacosanoïque	Acide cérotique	Cires des plantes, bactéries et insectes
C28:0	Acide octacosanoïque	Acide montanique	
C30:0	Acide tricontanoïque	Acide mélissique	
C5:0	Acide pentanoïque	Acide valérique	
C7:0	Acide heptanoïque	Acide énanthique	
C9:0	Acide nonanoïque	Acide pélargonique	
C11:0	Acide undécanoïque	Acide undécanoïque	
C15:0	Acide pentadécanoïque	Acide pentadécanoïque	
C17:0	Acide heptadécanoïque	Acide margarique	
C16:1 (n-7) cis	Acide cis-9-hexadécénoïque	Acide palmitoléique	Répandu en petites quantités
C16:1 (n-7) trans	Acide trans-9- hexadécénoïque	Acide palmitélaïdique	
C18:1 (n-9) cis	Acide 9-octadécénoïque	Acide oléique	
C18:1 (n-9) trans	Acide trans-9-octadécénoïque	Acide élaïdique	
C18:1 (n-7) trans	Acide trans-11-octadécénoïque	Acide vaccénique	
C18:2 (n-6)	Acide 9, 12-octadécadiénoïque	Acide linoléique	Bactéries
C18:3 (n-3)	Acide 9, 12, 15-octadécatriénoïque	Acide α -linoléique	Graines
C18:4 (n-3)	Acide 9, 11, 13, 15-tétraénoïque	Acide stéaridonique	Graines
C20:4 (n-6)	Acide 5, 8, 11, 14-eicosa-tétraénoïque	Acide arachidonique	Produits animaux
C20:5 (n-3)	Acide 5, 8, 11, 14, 17- eicosapentaénoïque	Acide timmodonique	Huiles marines
C22:5 (n-3)	Acide 7, 10, 13, 16, 19- docosapentaénoïque		Huiles marines
C22:6 (n-3)	Acide 4, 7, 10, 13, 16, 19- docosahexaénoïque		Huiles marines

Les composés mineurs

Comme indiqué plus haut, les huiles ou corps gras comprennent une fraction non glycéridique principalement représentée par :

- les stérols ou phytostérols de structure similaire au cholestérol (dont le composé principal est le bêta-sitostérol (Berasategi *et al.*, 2012)
- les tocophérols et tocotriénols, principalement l'alpha tocophérol ou vitamine E (Nyam *et al.*, 2009)
- les caroténoïdes (principalement le bêta-carotène précurseur de la provitamine A de grande activité biologique (Manorama et Rukmini, 1991)
- les composés phénoliques (à savoir l'hydroxytyrosol, le tyrosol et l'oleuropéine (Santos *et al.*, 2013))
- et des vitamines (A, D, E et K).

Tous ces éléments constituent l'ensemble des composés antioxydants endogènes ou naturellement présents dans ces corps gras. Ils sont capables d'interrompre les étapes d'initiation et de propagation de l'oxydation lipidique (Roman, 2013). Au cours des procédés de fritures répétées à haute température (150-200°C) pendant une durée prolongée, il se produit une dégradation des antioxydants endogènes parmi lesquels on retrouve les tocophérols (Aladedunye et Przybylski, 2014 ; Jose Crosa *et al.*, 2014) et les phénols, où leur efficacité est comparable à ceux synthétisés (Roman *et al.*, 2013). Les effets de la vitamine E ont largement été étudiés pour préserver l'huile durant le procédé de friture (Chiou *et al.*, 2012). Afin de maintenir la qualité des huiles, des recherches alternatives ont débouchées sur l'utilisation d'antioxydants synthétiques. Les plus connus et couramment utilisés sont le butyle hydroxyanisole (BHA), le butyle hydroxytoluène (BHT) et le butyle hydroquinone tertiaire (TBHQ). De nombreux auteurs ont suivi leurs efficacités au cours de la friture (Jose Crosa *et al.*, 2014 ; Zhang, Wu, et Weng, 2004 ; Nor *et al.*, 2008). Il en est de même pour d'autres antioxydants synthétisés (Aladedunye et Przybylski, 2014 ; Aladedunye *et al.*, 2012) tout comme ceux présents naturellement ou ajoutés (Aladedunye et Przybylski, 2013 ; Farhoosh *et al.*, 2012 ; Al-Khusaibi *et al.*, 2012 ; Procida *et al.*, 2009 ; Kidmose *et al.*, 2006 ; Chiou *et al.*, 2009 ; Aladedunye et Matthäus, 2014).

2.3 LE PROCEDE DE FRITURE

Le procédé de friture profonde, est défini comme étant un processus dans lequel un aliment est cuit par immersion dans une huile ou une graisse comestible chauffée au-dessus du point d'ébullition de l'eau. Le processus est traditionnellement réalisé dans des conditions atmosphériques et des températures de friture proches de 180°C (Dobraszczyk *et al.*, 2006). Frire dans de l'huile à une température comprise entre 160 et 180°C entraîne des vitesses de séchage très élevées (Baumann et Escher, 1995 ; Duran *et al.*, 2007). Cela provoque un transfert intense qui induit un fort départ d'eau. Il se crée en surface une zone déshydratée qui va progresser vers le cœur du produit installant, pour une frite, un différentiel de structure intéressant au plan organoleptique (Trystram, 2010). La friture est considérée comme étant le procédé le plus ancien et le plus couramment utilisé dans la préparation des aliments, en particulier dans la région méditerranéenne (Sánchez-Gimeno *et al.*, 2008).

La friture est utilisée principalement pour réaliser des transformations qui augmentent :

- la digestibilité des aliments en facilitant la gélatinisation des protéines et de l'amidon,
- la qualité sensorielle des aliments par le développement de texture, couleurs et saveurs
- la stabilisation des aliments par l'abaissement de la teneur en eau et l'inactivation des micro-organismes.

Toutes ces transformations ont lieu en un temps très court, de quelques secondes à quelques minutes et sont fortement dépendantes les unes des autres. C'est pourquoi la friture est considérée comme une opération intégrée et « multifonctionnelle » qui permet en une seule étape de déshydrater, cuire, texturer, imprégner et développer des saveurs (Rojas, 2007).

2.3.1 Les différents modes et dispositifs de friture

Il existe deux types de friture, lesquels se différencient par le rapport R (Guillaumin, 1973) entre la surface (S) du bain mesuré en dm^2 et le volume (V) d'huile exprimé en m^3 . R a donc les dimensions d'une surface spécifique. Le tableau montre les caractéristiques des différents types de friture.

Tableau 2-5: caractéristiques des différents types de friture (Graille, 1998)

Type de friture	R	Volume d'huile (dm ³)	Hauteur (mm)
Profonde	1,5	3,300	67
	2	2,400	49
Plate	20	0,250	5
	100	0,050	1

Avec R définie comme suit :

$$R = \frac{S}{V} \quad \text{Formule 2-1}$$

Où R= rapport du bain

S= surface du bain mesurée en dm²

V= volume d'huile exprimé en dm³

2.3.1.1 La friture plate

Ce type de friture consiste à mettre en contact une partie de la surface de la matrice alimentaire humide, ou à faible teneur en eau, avec une faible quantité de matière grasse.

La friture plate (à usage ménager) se réalise dans une poêle et utilise des corps gras variés comme le beurre, la margarine, ou diverses huiles. Le corps gras dans ce type de friture est recommandé à usage unique et son rapport surface d'huile/poids d'huile varie de 20 à 100. On constate que pour ce rapport, le fond de la poêle à un diamètre de 25 cm (Graille, 1998).

2.3.1.2 La friture profonde

Ce type de friture consiste à l'immersion totale de la matrice alimentaire humide, ou à faible teneur en eau, dans un bain de matière grasse pendant un temps variable mais limité. Le corps gras dans ce type de friture peut être utilisé une dizaine de fois alors qu'en friture plate, la poêle est nettoyée après chaque usage. On constate que le rapport surface d'huile/poids d'huile varie de 1,5 et 2 pour une friteuse ménagère d'un diamètre de 25 cm (Graille, 1998).

2.3.2 Principes de l'opération de friture

La friture est un procédé rapide mettant en jeu le transfert simultané de chaleur et de matières (de direction opposée) au sein d'un matériau. Finalement, à partir d'un produit brut, la friture combine en une seule étape, déshydratation et cuisson, avec la gélatinisation de l'amidon, la dénaturation des protéines, l'aromatisation et la coloration via les réactions de Maillard et l'entrée d'huile (Courtois *et al.*, 2012).

2.3.3 Dispositif de friture

Le procédé de friture profonde se réalise dans une friteuse électrique à usage domestique ou industriel sous pression atmosphérique ou sous vide. Il existe plusieurs marques de friteuses électriques. La plus populaire est la marque du groupe SEB. D'autres groupes industriels ont développé de nouvelles technologies concernant les friteuses. C'est le cas des groupes Bonnet qui ont mis au point la friteuse « FR 25 », la « Frymaster » de Enodis, la « Turbofrit » de Capic Kiremko la « Fado » (Anon, 2005). Une friteuse sous vide est une installation de friture industrielle logée dans une chambre à vide. Parmi les nombreuses technologies de friture, la friture sous vide a une importance stratégique pour l'avenir dans la préparation d'aliments frits (Granda *et al.*, 2004). La technologie offre des avantages importants, tels que l'amélioration de la sécurité des produits frits et réduit l'oxydation de l'huile en raison de la transformation qui se fait à basse température. Les intérêts dans les applications de la friture sous vide (Garayo et Moreira, 2002) et le développement de nouvelles conceptions de friteuse (Moreira *et al.*, 1999) permettent l'étude approfondie de la génération de l'acrylamide pendant la friture, afin de réduire la formation de produits toxiques dans les produits frits.

2.3.3.1 Friteuse atmosphérique

C'est une friteuse traditionnelle électrique permettant de réaliser le procédé de friture dans des conditions atmosphériques conventionnelles.

2.3.3.2 Friteuse sous vide

Contrairement à la friteuse traditionnelle, la friteuse sous vide est selon Dueik *et al.*, 2012) un système fermé où la friture est effectuée sous pression réduite par rapport à la pression

atmosphérique (de préférence inférieure à 7000 Pa). Ceci permet un départ moins important de l'eau avec pour conséquence une température de friture plus basse (Mir-Bel *et al.*, 2009). Cette technique offre aussi une réduction de la teneur en huile dans les aliments frits (Da Silva et Moreira, 2008 ; Garayo et Moreira, 2002 ; Granda *et al.*, 2004; Yagua et Moreira, 2011), une teneur en acrylamide inférieure (Granda *et al.*, 2004) ainsi que l'amélioration des qualités organoleptique et nutritionnelle (Shyu et Hwang, 2001; Da Silva et Moreira, 2008 ; Troncoso et Pedreschi, 2009; Dueik *et al.*, 2010). Ce procédé permet d'augmenter la durée de vie et la qualité de l'huile (Shyu *et al.*, 1998 ; Yagua et Moreira, 2011 ; Dueik *et al.*, 2012). Le procédé de friture sous vide présente des avantages techniques non négligeables par rapport à la friture classique (Anon, 2013) :

- D'abaisser la température d'ébullition de l'huile de friture entre 115°-120°C au lieu de 180°C, tout en limitant les phénomènes de brunissement et l'apparition d'acrylamide.
- D'éliminer de l'oxygène grâce au vide créé, limitant les réactions d'oxydation dans l'huile.
- De conserver au mieux les qualités organoleptiques et sensorielles du produit.
- Une utilisation plus longue de l'huile et la réduction des émanations de vapeurs de friture.
- De se procurer de produits innovants à partir des fruits et légumes.

2.3.4 Les principales variables du procédé de friture

Lors de l'opération de friture, plusieurs facteurs clés interviennent dans le bon déroulement du procédé. Dans la littérature plusieurs auteurs ont étudié les facteurs tels que la durée et la température (Arias-Mendez *et al.*, 2013), le type d'huile (Chen et Moreira, 1997 ; Rimac-Brncic *et al.*, 2004), le rapport entre le produit et l'huile (Alvis *et al.*, 2009), le type de matériel utilisé et la nature des aliments à frire (Chen et Moreira, 1997 ; Friedman, 2003; Grob, 2007; Romani *et al.*, 2009).

2.3.4.1 La durée de friture

La durée de friture est l'un des paramètres importants dans le procédé de friture. En général, la durée de friture est fortement liée à la température et au rapport de masse entre produit/huile (Moyano et Pedreschi, 2006). Cette durée peut s'avérer courte (quelques minutes) lorsque la température employée est élevée de 150-200°C (Hubbard et Farkas, 1999 ; Mir-Bel *et al.*, 2009) et serait pour certains auteurs (Courtois *et al.*, 2012) responsable de la préservation de certains constituants nutritionnels. Lorsque la température se trouve être

basse, la durée devient plus longue (24 min pour une température de 120°C comme indiqué dans les travaux de Rojas *et al.* (2006), ce qui conduirait notamment aux problèmes d'absorption d'huile. Selon Romano *et al.* (2012), un temps plus long conduit également à une production plus intense en acides gras libres (AGL) (Mazza et Qi, 1992), des composés polaires tels que des dimères et des acylglycérols de triacylglycérol oxydés (Romero *et al.*, 1998 ; Xu *et al.*, 1999), des dimères (Gordon et Kourkimská, 1995), et des polymères (Tompkins et Perkins, 2000).

2.3.4.2 La température de friture

Au cours de l'opération de friture, l'eau contenue dans les aliments est évaporée grâce aux températures élevées 160-180°C (Debnath *et al.*, 2012) ou moyenne 175°C (Combe et Rossignol-Castera, 2010) employées dans ce procédé. Cela affecte la saveur, l'arôme et la texture du produit qui dépend aussi de la quantité d'huile absorbée.

Ces hautes températures procurent non seulement les caractéristiques (croustillance, couleur, goût, texture) recherchées par le consommateur dans un aliment frit, mais conduit également à la formation des composés potentiellement toxiques tel que l'acrylamide reconnu pour être cancérigène (Gertz et Klostermann, 2002 ; Grob *et al.*, 2003 ; Elmore *et al.*, 2005 ; Rosén et Hellenäs, 2002 ; Tareke *et al.*, 2002; Kita *et al.*, 2007; Bassama *et al.*, 2012). Cette dégradation rapide de l'huile, qui se fait en présence d'eau et d'oxygène atmosphérique (Paul *et al.*, 1997 ; Gloria et Aguilera, 1998 ; Saguy et Dana, 2003 ; Nor *et al.*, 2008), conduit ainsi à la perte de sa valeur nutritive en affectant également la qualité de l'aliment. Ces températures hautes seraient également responsables d'un temps de cuisson plus court (Courtois *et al.*, 2012). C'est pourquoi plusieurs auteurs (Pedreschi *et al.*, 2007) pensent qu'il est judicieux de réaliser la friture à des températures basses tout en garantissant la qualité du produit pour réduire par exemple le taux d'acrylamide (Haase *et al.*, 2003 ; Pedreschi *et al.*, 2004 ; Pedreschi *et al.*, 2006). D'autres auteurs avancent que les températures basses n'influencent pas la teneur en huile (Gamble *et al.*, 1987 ; Moreira, *et al.*, 1997 ; Courtois *et al.*, 2012) et conduisent à des produits moins gras comme l'ont observé Moreira et ses collaborateurs (1995) (cité par Kawas et Moreira, 2001) dans les chips de tortilla frit à 150°C, par rapport à une température de 190°C. Néanmoins certains auteurs pensent que les températures basses sont responsables des problèmes d'absorption d'huile qui peuvent aller de 4 à 10 % dans le cas des frites de pommes de terre et 30 à 40 % dans les cas des chips (Combe et Rossignol-Castera, 2010).

Beaucoup d'auteurs ont mentionné que la quantité d'huile absorbée par le produit et ses propriétés dépendent du facteur « température » (Gamble et Rice, 1987 ; Moreira *et al.*, 1997 ; Dobarganes *et al.*, 2000 ; Mellema, 2003 ; Saguy et Dana, 2003 ; Kita *et al.*, 2007).

La perte d'eau et l'absorption de l'huile augmentent en fonction du temps de friture et sont affectées par la température de friture et par l'épaisseur de l'échantillon (Guillaumin, 1988 ; Krokida *et al.*, 2000b). D'autres auteurs avancent que les hautes températures jouent le rôle de barrière physique contre l'huile (Pinthus *et al.*, 1995 ; Dobarganes *et al.*, 2000b ; Dana et Saguy, 2006). Certains auteurs (Boskou et Elmadfa, 1999), cité par Rojas (2007) pensent qu'une température élevée serait responsable d'une diminution de la perte d'éléments nutritifs dans le produit frit.

Ces contradictions font qu'il est très difficile de maîtriser la friture ou encore moins prédire les transformations qui ont lieu (absorption d'huile, dégradation d'huile, perte d'élément nutritifs et qualité de l'aliment). De nombreux auteurs ont dans leurs travaux, mesuré le profil de température en cours de la friture profonde traditionnelle (Baik et Mittal, 2005 ; Sosa-Morales *et al.*, 2006 ; Lioumbas *et al.*, 2012), de la friture sous vide (Yagua et Moreira, 2011) et même au cours de la friture à la poêle (Oroszvari *et al.*, 2005). Cette mesure se fait au moyen de thermocouples dont les sondes sont placées soit à la surface, soit au centre et même parfois entre les deux parties de la matrice. Les données sont récupérées au moyen d'un enregistreur de données relié à un ordinateur.

Certains auteurs ont largement étudié de façon explicite le comportement de la température de friture de l'huile et de la matière à frire. C'est le cas des travaux de Lioumbas *et al.* (2012) où ils étudient le phénomène avec deux huiles de compositions différentes avec ou sans agitation.

La **figure 2-4** montre que les courbes de température enregistrée à trois endroits différents au cours de la friture, présentent une allure similaire, malgré les petits écarts de température observés. En fonction de la température utilisée, l'allure des courbes reste la même. Ces derniers auteurs ont également montré que la charge du produit influe sur le profil de température au cours de la friture, comme le montre la figure 2-5. Les chutes des températures observées les premières secondes de friture comme le montrent ces figures, sont les résultats du transfert de chaleur de l'huile vers la matrice lors de l'immersion dans l'huile (Yagua et Moreira, 2011 ; Lioumbas, Kostoglou *et al.*, 2012). La remontée de température a lieu lorsque la quantité d'énergie fournie par la friteuse devient supérieure à la température d'ébullition de l'eau.

De nombreux auteurs dans le cadre de la friture profonde, ont évoqué que la température au cœur de la matrice augmente progressivement jusqu'à atteindre 100°C (température de

saturation de l'eau) ou parfois elle dépasse très légèrement. Certains auteurs (Chen et Moreira, 1997 ; Lioumbas *et al.*, 2012) ont précisé que le ratio huile/matière n'affecte pas la température au centre de la matrice et reste toujours aux environs de 100°C.

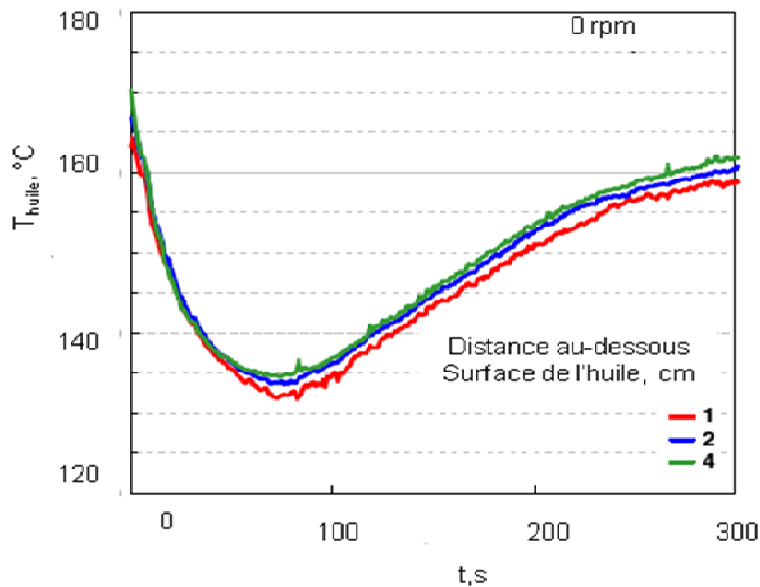


Figure 2-3 : Mesure de la température de l'huile d'olive au cours de la friture à la température initiale de 170°C et pour une charge de 1/7 Kg de pommes de terre/ L d'huile à une distance 1, 2 et 4 cm de la surface du bain (Lioumbas *et al.*, 2012).

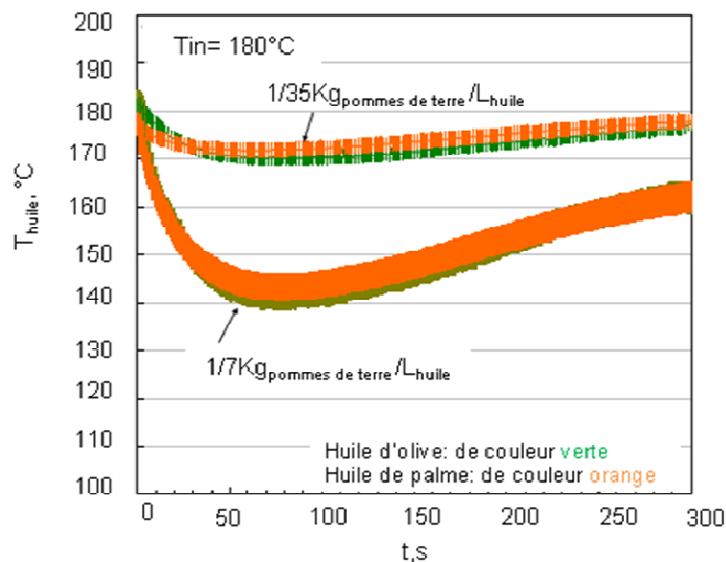


Figure 2-4 : Les profils de température de l'huile pour les deux charges au cours de la friture à la température initiale de l'huile (180°C). La courbe verte représente l'huile d'olive et la courbe orange l'huile de palme (Lioumbas *et al.*, 2012).

Dans la friture sous vide, les mêmes observations ont été faites sur la température au cœur de l'aliment qui se trouve être proche de 100°C comme présenté dans les travaux de (Yagua et Moreira, 2011).

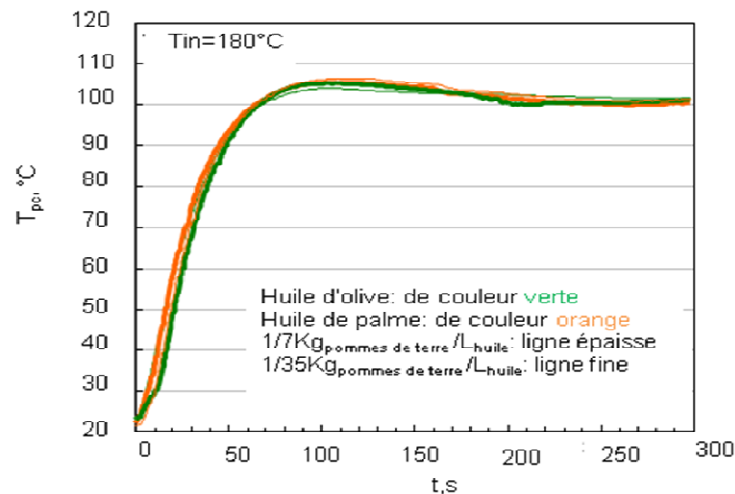


Figure 2-5 : Profils de température au centre du bâtonnet de pomme de terre pour différentes charges au cours de la friture à la température initiale de 180°C. La courbe verte représente l'huile d'olive et la courbe orange l'huile de palme (Lioumbas *et al.*, 2012).

2.3.4.3 Le rapport quantité huile / matière

Ce paramètre a autant d'importance que la température et la durée de friture. (Fiselier *et al.*, 2006), signalent que les deux paramètres cités plus haut dépendent largement de ce rapport. D'autres études mentionnent également ce phénomène (Rimac-Brncic *et al.*, 2004 ; Fiszman *et al.*, 2005 ; Dana et Saguy, 2006). Lorsque l'on plonge une grande quantité d'aliment (à haute teneur en humidité) dans de l'huile chaude, celle-ci chute rapidement en température, ce qui entraîne un temps de cuisson plus long. Il est ainsi recommandé d'évaluer la quantité d'aliment nécessaire par rapport à la taille de la friteuse et son niveau d'huile. Mehta et Swinburn, 2001 cité par Courtois *et al.*, (2012) ont défini un ratio à l'échelle industrielle qui est autour de 1/6.

2.3.4.4 La pression réduite

La cuisson sous pression réduite (abaissée jusqu'à 1,33 kPa pour la pomme de terre (Yagua et Moreira, 2011)), permet de produire des aliments ayant une faible quantité d'huile absorbée avec des caractéristiques de couleur, de texture, de saveur recherchées par le consommateur (Garayo et Moreira, 2002 ; Da Silva et Moreira, 2008 ; Mariscal et Bouchon, 2008; Mir-Bel *et al.*, 2009). Elle évite également d'utiliser des hautes températures lors de la friture. Pour des raisons de santé, de nombreux auteurs suggèrent que la pression réduite dans le procédé de friture réduit la formation des composés indésirables dans l'huile (Garayo et Moreira, 2002 ; Shyu *et al.*, 2005) et dans le produit (Granda *et al.*, 2004)

De nombreux auteurs (Mariscal et Bouchon, 2008 ; Troncoso et Pedreschi, 2009) considèrent ce procédé comme étant une meilleure technique pour produire des légumes et des fruits de qualités comparée à la friture classique sous pression atmosphérique. Shyu et Hwang (2001) ont étudié l'influence de la friture sous vide sur les chips de pommes par la méthodologie des surfaces de réponse permettant d'optimiser la production de chips ayant de bonnes caractéristiques de couleur, de flaveur et de texture.

2.3.5 Principes physiques de l'opération de friture

2.3.5.1 La température d'ébullition de l'eau contenu dans l'aliment

L'eau est le principale constituant dans la plus part de nos aliments à l'état naturel où elle occupe plus de 90% du poids à l'exception des graines. Il a été observé depuis fort longtemps que l'eau présente dans les tissus végétaux ou animaux peut être plus ou moins « disponible » et l'on a distingué deux états : « eau libre » et « eau liée ». Cette dernière peut être fixée plus ou moins fortement jouant ainsi un rôle très important pour la stabilité de l'aliment. Il est reconnu que la température et la durée sont les principales variables dans le procédé de friture ayant une influence sur le transfert de masse, des transformations et réactions qui surviennent. La friture est considérée comme un procédé de séchage car elle nécessite des températures au dessus du point d'ébullition de l'eau pour apporter de la chaleur au produit par l'intermédiaire de l'huile. De nombreux auteurs ont eu recours au séchage-friture pour abaisser la teneur en eau dans les produits amylacés, notamment ceux à base de pommes (Rice et Gamble, 1989 ; Costa *et al.*, 1997), de la pâte de maïs (Moreira *et al.*, 1995 ; Moreira *et al.*, 1997), de plantain (Lemaire *et al.*, 1997 ; Diaz *et al.*, 1999) de

pomme de terre (Hagenimana *et al.*, 1998) ou de manioc (Soekarto *et al.*, 1992 ; Vitrac *et al.*, 2002).

2.3.5.2 Transferts d'énergie

Le procédé de friture est considéré comme étant une opération dans laquelle s'effectuent des transferts de chaleur couplés aux transferts de masse entre la matrice alimentaire et le milieu de friture. Des auteurs (Hallstrom *et al.*, 1988 ; Alvis *et al.*, 2009) évoquent que le transfert de chaleur en friture se fait par une combinaison du mode convectif dans le bain d'huile et du mode conductif à l'intérieur de la matrice alimentaire.

Lorsqu'un aliment est totalement plongé dans une friteuse contenant de l'huile chaude, celui-ci reçoit le même flux de chaleur sur toute sa surface (**figure 2-6**), entraînant une apparence quasiment uniforme à la sortie du bain de friture. Farkas *et al.* (1996a), cités par certains auteurs (Kawas et Moreira, 2001 ; Budzaki et Seruga, 2005) ont défini et détaillé 4 étapes différentes se produisant au cours de la friture qui correspondent : (1) au chauffage initial, (2) aux surfaces d'ébullition, (3) à la chute du taux et enfin au (4) point final des bulles.

Dans la 1^{ère} étape, l'huile réchauffée à la température équivalente à la température d'ébullition de l'eau recouvre l'aliment immergé. Il a lieu, au cours de cette étape, un transfert de chaleur par convection naturelle sans évaporation de l'eau de la surface du produit (vitesse de déshydratation quasiment nulle).

Dans la seconde étape, l'eau à la surface commence à s'évaporer brusquement sous forme de bulles. On passe alors dans ce cas, à un transfert de chaleur par convection naturelle à un transfert de chaleur par convection forcée du fait des mouvements violents occasionnés par le départ de l'eau contenue dans l'aliment et par la chaleur apportée par l'huile. On observe également à cette étape le début de la formation de la croûte.

Au cours de la troisième étape, la température augmente progressivement dans le cœur de l'aliment et il s'en suit des changements physicochimiques (gélatinisation de l'amidon, dénaturation des protéines, augmentation de l'épaisseur de la croûte) ainsi que la diminution de la vitesse de déshydratation (transfert d'eau) à la surface.

La dernière étape est caractérisée par une absence de bulles autour de l'aliment avec une vitesse de déshydratation faible qui redevient quasiment nulle.

Les mêmes auteurs ci-dessus ont regroupé de façon générale ces 4 étapes en deux grandes phases. Nous avons la phase qualifiée de non bouillante qui regroupe les étapes 1 et 4 ainsi que la phase qualifiée de phase d'ébullition qui regroupe les étapes 2 et 3.

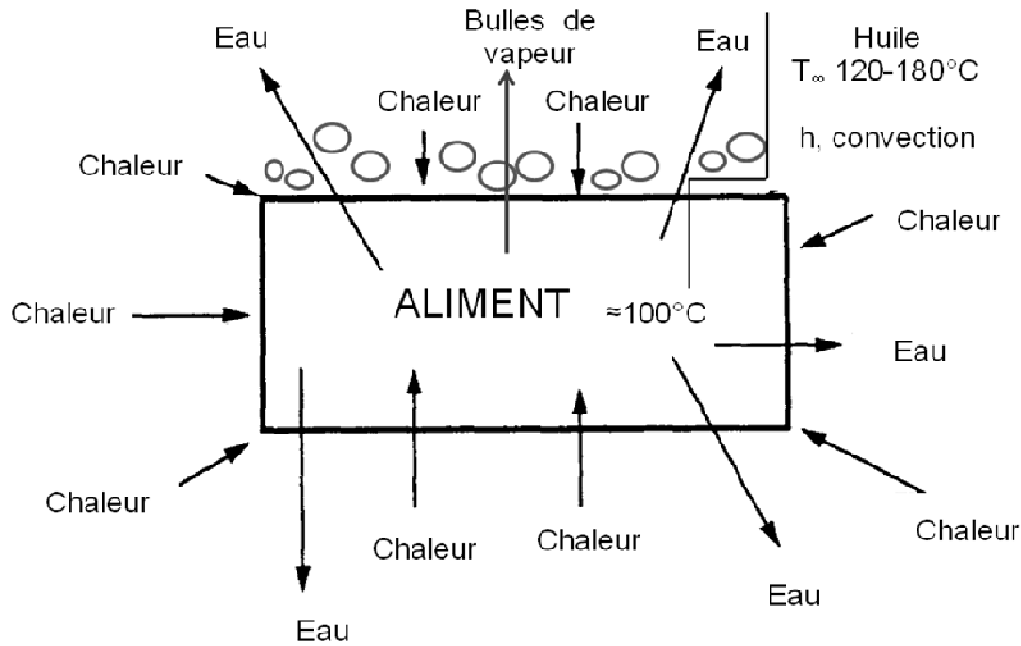


Figure 2-6: Transferts de chaleur et de masse au cours de la friture d'un aliment (Gupta, 1993) schéma repris par Dincer et Yildiz, (1996) et modifié.

Pour obtenir des produits ayant des caractéristiques sensorielles désirées (texture, couleur et flaveur), la connaissance du coefficient de transfert de chaleur par convection h_c (pendant la phase d'ébullition) joue un rôle significatif dans les changements de température (Ni et Datta, 1999 ; Erdogdu et Dejmek, 2010) et dirige les mécanismes de transfert de chaleur et de masse (Farinu et Baik, 2007). Sa mesure est faite de façon directe ou indirecte (selon la littérature), mais la plupart du temps la méthode indirecte est la plus couramment employée. Celle-ci permet d'utiliser des pièces métalliques afin de mesurer le flux thermique pour simuler les conditions hydrodynamiques de l'échantillon. Plusieurs travaux ont été menés sur la base de la mesure du coefficient de transfert de chaleur pendant la friture à pression atmosphérique (Miller *et al.*, 1994 ; Hubbard et Farkas, 1999 ; Hubbard et Farkas, 2000; Costa *et al.*, 1999; Sahin *et al.*, 1999; Baik et Mittal, 2002; Budzaki et Seruga, 2005; Seruga et Budzaki, 2005; Sosa-Morales *et al.*, 2006; Yildiz *et al.*, 2007 ; Farinu et Baik, 2005 ; Farinu et Baik, 2007 ; Alvis *et al.*, 2009 ; Debnath *et al.*, 2012), sous pression réduite (Yagua et Moreira, 2011) et sous haute pression (Erdogdu et Dejmek, 2010).

Quelques exemples de valeurs de h_c sont présentés dans le **tableau 2-6**.

Les valeurs montrent qu'elles sont fonction de différentes matrices et conditions de friture. C'est pourquoi Baik et Mittal (2002) cités par Farinu et Baik, 2007 ont précisé que la valeur

de h_c pendant la friture est affectée par le régime d'ébullition, la vitesse, la fréquence et l'ampleur de l'agitation de l'huile.

En nous référant aux figures ci-dessous, le coefficient de transfert de chaleur augmente lors de l'immersion et du chauffage de la matrice dans les conditions (2) et il a tendance à baisser jusqu'à la valeur initiale (cas de la **figure 2-8**), lorsque la vitesse d'ébullition diminue.

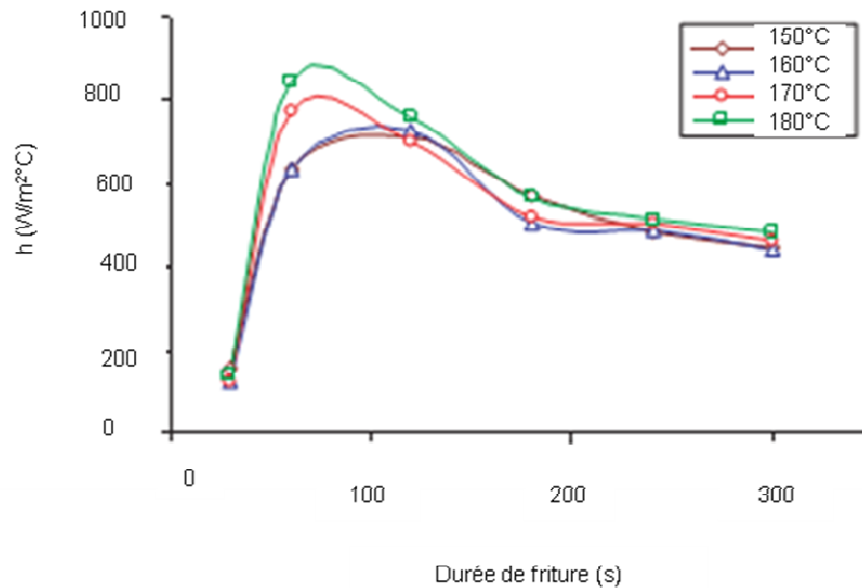


Figure 2-7 : Coefficient de transfert de chaleur pendant la friture de l'échantillon moyen de la patate douce ($D / L = 13,5$) (rapport entre diamètre et épaisseur de l'échantillon) (Farinu et Baik, 2007).

Tableau 2-6 : Valeurs des coefficients de chaleur par convection durant le procédé de friture

Nature échantillon (huile)	Nature échantillon (aliment)	Coefficient de transfert h_c par convection ($W.m^2.C^{-1}$ ou $W.m^2.K^{-1}$)	Température (°C)	Référence
Huile du son de riz	Nuggets de crevette	230 $W.m^2.C^{-1}$	173	Sukumar Debnath <i>et al.</i> 2012
Huile de tournesol	Plaques de viandes de porc	174,38±18,57 $W.m^2.C^{-1}$	90	Sosa-Morales <i>et al.</i> , 2006
		193,45±10,87 $W.m^2.C^{-1}$	100	
		226,10±14,29 $W.m^2.C^{-1}$	110	
Huile fraîche de canola	Tranches de pommes de terre (1,6 mm épaisseur et 5,08 cm de diamètre)	2204,8 $W.m^2.K^{-1}$	120	Yagua et Moreira, 2011
		2523,3 $W.m^2.K^{-1}$	130	
		2649,7 $W.m^2.K^{-1}$	140	
Huile végétale de canola	Disques de patate douce (2,5x3,5x4 cm)	450-710 $W.m^2.C^{-1}$	150	Farinu et Baik, 2007
		450-722 $W.m^2.C^{-1}$	160	
		450-760 $W.m^2.C^{-1}$	170	
		450-837 $W.m^2.C^{-1}$	180	
Huile de canola	Cylindre de pomme de terre (20x80mm)	1700	120	Hubbard et Farkas (1998)
		2300	150	
		3500	180	

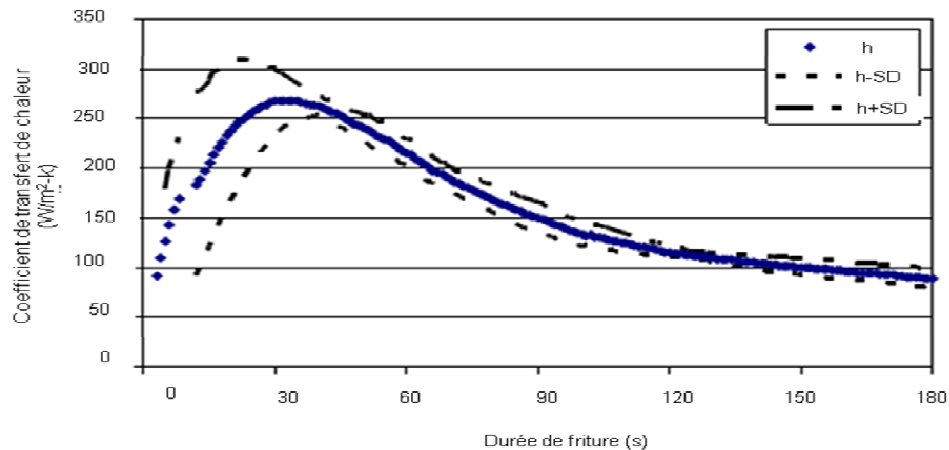


Figure 2-8 : Variation du coefficient de transfert de chaleur (valeur moyenne des dix expériences avec écart-type) durant la friture atmosphérique en fonction du temps de friture (Erdogdu et Dejmek, 2010).

2.3.5.3 Transferts de matière : mécanisme d'absorption d'huile

La cuisson des aliments par friture permet d'obtenir des aliments cuits avec des caractéristiques uniques tels qu'une texture croustillante, une saveur et des odeurs agréables. Au cours de cette même cuisson, il se produit un double transfert de masse qui se définit par la perte d'eau et l'absorption d'huile. Blumenthal (1991) cité par Debnath *et al.* (2003) définissent dans leurs travaux, trois types de transfert de masse auxquels ils ajoutent aux deux premiers « le lessivage des composants alimentaires de l'aliment ».

L'absorption d'huile dans les aliments est le phénomène qui nous intéresse le plus dans ce chapitre, car elle fait l'objet d'une attention particulière du fait qu'elle affecte les qualités nutritionnelles de l'aliment (Pedreschi et Moyano, 2005 ; Nasiri *et al.*, 2011).

La quantité d'huile absorbée peut atteindre dans certains cas le 1/3 du poids du produit (Mellema, 2003) ou dans d'autres cas 35 à 40% (Debnath *et al.*, 2009), 45% (Funami *et al.*, 1999 ; Saguy et Pinthus, 1995), voire 50% du poids total (Pinthus *et al.*, 1993 ; Sothornvit, 2011). Ceci s'explique par le fait que généralement les aliments pauvres en lipides naturels absorbent un peu plus de matières grasses. C'est le cas des frites qui avec 0,2% d'huile initiale, se retrouvent avec une teneur de 14% après friture. Les chips de pommes de terre ont une teneur de 40% après friture et le poisson voit sa teneur en huile varier entre 1,4 et 18% d'huile selon son mode de préparation (Smith *et al.*, 1985 ; Makinson *et al.*, 1987).

Le degré d'absorption d'huile est significativement affecté par divers facteurs (Debnath *et al.*, 2003) qui rendent ce procédé multifactoriel complexe à expliquer Ziaifar, 2008 :

- la qualité de l'huile dans laquelle la matrice alimentaire est frite (Abdel-Aal et Karara, 1986 ; Blumenthal, 1991 ; Parimala et Sudha, 2012)
- la composition chimique de l'huile (Ng *et al.*, 1957)
- la température
- le temps de friture
- la forme du produit (Fan et Arce, 1986 ; Pravisani et Calvelo, 1986 ; Gamble *et al.*, 1987a)
- la teneur en eau initiale (Gamble et Rice, 1987 ; Gamble et Rice, 1988 ; Gamble *et al.*, 1987a ; Rice et Gamble, 1989 ; Pinthus *et al.*, 1993).
- la tension interfaciale initiale (Pinthus et Saguy, 1994)
- la porosité (Gamble et Rice, 1988 ; Du Pont *et al.*, 1992 ; Pinthus et Saguy, 1994 ; Lulai et Orr, 1979)
- la croûte formée (Keller *et al.*, 1986 ; Gamble *et al.*, 1987b ; Farkas *et al.*, 1992)
- la méthode de friture (Bajaj et Singhal, 2007 ; Parimala et Sudha, 2012)
- les ratios entre produit/huile (poids/poids)
- les prétraitements (Moreira *et al.*, 1999 ; Khalil, 1999 ; Innawong, 2001 ; Cuesta *et al.*, 2001 ; Rimac-Brncic *et al.*, 2004 ; Fiszman *et al.*, 2005 ; Dana et Saguy, 2006 ; Dehghan Nasiri *et al.*, 2011).

Malgré les travaux effectués par de nombreux chercheurs (Saguy et Pinthus, 1995 ; Ufheil et Escher, 1996 ; Moreira *et al.*, 1997) sur les mécanismes d'absorption d'huile et de leur contrôle, les aliments frits continuent à contenir une teneur élevée en huile. C'est le cas des aliments frits tels que les pois chiches (Annapure *et al.*, 1999), les pommes de terre (García *et al.*, 2002 ; Rimac-Brncic *et al.*, 2004 ; Tran *et al.*, 2007), les nuggets de poulet (Sahin *et al.*, 2005), les rondelles de carottes (Akdeniz *et al.*, 2006) et les produits céréaliers (Albert et Mittel, 2002). Dana et Saguy, 2006 (cités par Mir-Bel *et al.*, 2009), rapportent dans leurs travaux que trois mécanismes permettent de décrire le phénomène complexe d'absorption d'huile au cours de la friture. Il s'agit du remplacement de l'eau, la phase de refroidissement et les effets des agents de surface tensio-actifs. Nous développerons brièvement à côté des trois mécanismes liés à l'absorption de l'huile, le type et le vieillissement de l'huile.

Remplacement de l'eau

L'absorption d'huile dans les produits frits est principalement un phénomène de surface (Mariscal et Bouchon, 2008 ; Gazmuri et Bouchon, 2009). Au cours de la friture, l'eau contenue dans l'aliment, s'évapore par les pores et se retrouve dans le bain d'huile. Pendant cette opération, il y a formation d'une zone « sèche » sous la forme d'une croûte (Dana et Saguy, 2006), qui jouera un rôle dans les transferts de chaleur et de matière (Keller *et al.*, 1986 ; Krokida *et al.*, 2000a ; 2000b). Les matrices, vidées de l'eau vaporisée, vont se remplir par imprégnation d'huile (ISaguy et Dana, 2003). Certains travaux montrent que l'absorption d'huile par l'aliment est proportionnelle à sa teneur en eau initiale (Gamble et Rice, 1987 ; Lamberg *et al.*, 1990 ; Mehta et Swinburn, 2001 ; Saguy et Pinthus, 1995 ; Southern *et al.*, 2000). Par contre, l'intérieur de l'aliment reste encore humide et moelleux. C'est le cas des frites ou des beignets (Pinthus *et al.*, 1995).

Les changements de structures cellulaires (Pedreschi *et al.*, 2001) ayant lieu font que dès les premiers 20 secondes de friture, l'huile est aspirée à travers les tunnels ou les pores de l'aliment laissés par l'eau (McDonough *et al.*, 1993 ; Moreira *et al.*, 1997). Quelques auteurs affirment que le volume total de matières grasses absorbé serait égal au volume total de l'eau prélevée (Pinthus *et al.*, 1993 ; Mellema, 2003).

Nous pensons aborder dans ce sous-chapitre, la notion de « capillarité ». Celle-ci survient lorsque les forces intermoléculaires adhésives entre le liquide et un solide sont plus fortes que les forces intermoléculaires cohésives dans le liquide (Ziaifar, 2008). Moreira *et al.* (1999) ont introduit une relation physique entre l'absorption de l'huile et la porosité indiquant que le mécanisme d'absorption d'huile peut être causé par des forces capillaires. En 1997, Moreira *et al.* 1997, affirment que les petits pores créent des pressions capillaires supérieures et conduiraient à une teneur en huile plus élevée. Ce mécanisme pourrait fournir une explication possible de la relation directe observée entre la perte d'eau et l'absorption d'huile (Rice et Gamble, 1989).

La phase de refroidissement après friture

Pendant la phase de refroidissement après friture, une bonne partie de l'huile pénètre dans l'aliment (Ufheil et Escher, 1996 ; Aguilera et Gloria-Hernandez, 2000 ; Bouchon *et al.*, 2003 ; Debnath *et al.*, 2009). Ce phénomène apparaît en raison de la condensation due à la diminution de la pression de vapeur interne favorisant un « effet vide » (Shyu et Hwang, 2001 ; Dana et Saguy, 2006 ; Saguy et Dana, 2003 ; Sothornvit, 2011). Lorsqu'un produit est retiré de la friteuse, on assiste à une diminution de la température, la vapeur se condense et

la pression dans le produit diminue brusquement, favorisant alors l'absorption de l'huile. Les premières observations expérimentales d'Ufheil et Escher (1996) sur des tranches de pommes de terre ont montré que l'absorption d'huile se produit lors du refroidissement. Ils ont ajouté de l'huile colorée comme indicateur à l'huile de friture et ont constaté que plus de 80% de l'huile dans les chips a été absorbé après que l'aliment est été retiré du bain d'huile. Cette phase représente un point clé dans les problèmes d'absorption d'huile.

La figure ci-dessous montre le comportement de l'huile au cours de la friture.

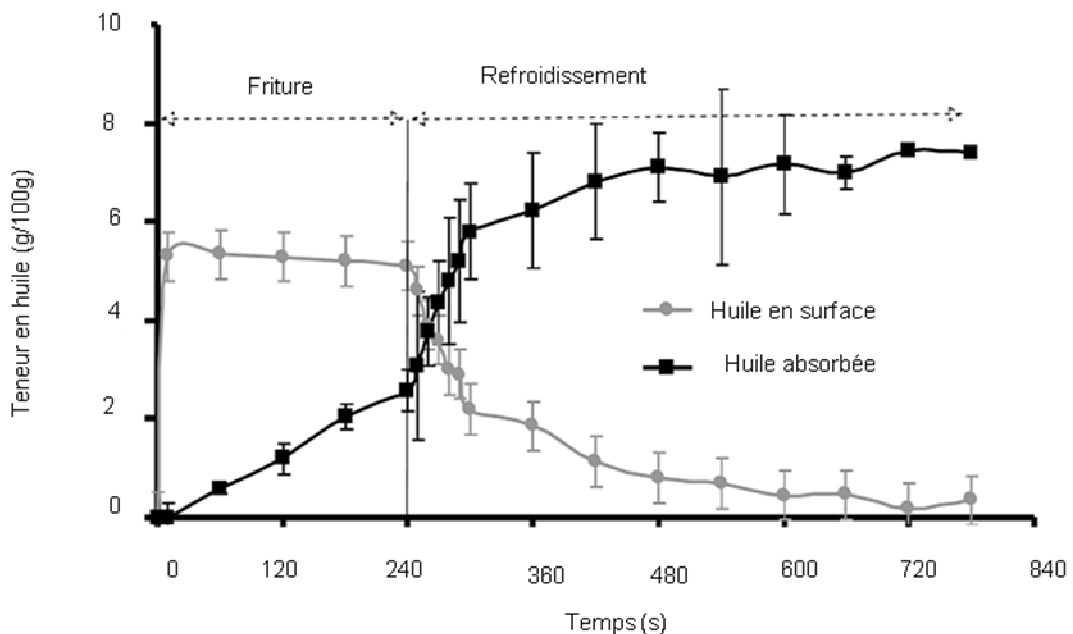


Figure 2-9 : Teneur en huile absorbée ou restée à la surface de frites lors de la friture (170°C) et du refroidissement (20°C) [la discrimination de la teneur en huile absorbée et de surface en utilisant la méthode Moreira *et al.*, (1997) avec de l'éther de pétrole]. Schéma repris par Courtois *et al.*, 2012).

De nombreuses études ont montré que la majeure partie de l'huile est limitée à la région de surface des pommes de terre frites (Bouchon *et al.*, 2003 ; Bouchon *et al.*, 2001 ; Pedreschi *et al.*, 1999). Il a été prouvé que l'huile est surtout absorbée pendant la période de refroidissement (Ufheil et Escher, 1996 ; Aguilera et Gloria-Hernandez, 2000 ; Bouchon *et al.*, 2003). Cependant, des travaux montrent que l'huile est aussi absorbée pendant la friture. Bouchon *et al.* (2003) ont noté qu'une petite quantité d'huile, qu'ils ont appelé « huile structurelle », pourrait être absorbée pendant la friture, par opposition à l'huile adhérent à la surface ou huile aspirée pendant le refroidissement.

Moreira et ses collaborateurs (1997) ont également vérifié ce phénomène sur les tortillas. Ils ont observé que seulement 20% de l'huile se retrouve être présente à l'intérieur de l'aliment à la fin de la friture, tandis que 80% restent à la surface du produit. Après refroidissement environ 64% de cette huile, localisée en surface, est absorbée à l'intérieur. La microstructure de surface et les caractéristiques du produit, ainsi que la viscosité de l'huile, jouent un rôle clé affectant l'ampleur du phénomène d'absorption de l'huile par la matrice.

Les agents de surface

Les agents de surfaces encore appelés tensio-actifs sont responsables des différences de qualité entre l'intérieur et l'extérieur de l'aliment induit par le vieillissement de l'huile (Blumenthal, 1991 ; Dana et Saguy, 2006). Les composés issus de l'hydrolyse des AG (mono et diglycérides) et les composés polaires formés sont considérés comme tels. Certains agissent comme agents mouillants favorisant le contact entre l'huile et l'aliment et entraînent une absorption beaucoup plus élevée. Ceci s'explique par le fait que, ces composés sont responsables de la baisse de la tension superficielle entre l'huile et l'eau augmentant ainsi l'angle de contact huile/produit (Dana et Saguy, 2006 ; Kim *et al.*, 2011). Les CPT quant à eux sont responsables de la mousse qui se forme dans le bain de friture et qui évolue dans le temps. Mais, Dana et Saguy (2006) ont rapporté dans leur étude que la formation des agents tensio-actifs ne fournit qu'une explication partielle de l'absorption importante d'huile pendant la friture prolongée.

Le type d'huile

De nombreux auteurs ont mentionné que la nature et la composition en acides gras de l'huile utilisée en friture profonde est un des facteurs importants influençant le phénomène d'absorption d'huile. Kiatsrichart et ses collaborateurs (2003) ; Mehta et Swinburn, 2001 ; cités par Chotimarkorn et Silalai (2008) montrent que les huiles doivent être composées d'un pourcentage faible en AGPI (tels que les acides linoléique ou linolénique), élevé en AGMI (acide oléique) et modéré en AGS. Ces derniers auteurs affirment que la composition en acides gras influe sur la saveur des aliments frits, sa stabilité et sur l'absorption de l'huile (Rimac-Brncic *et al.*, 2004). La formation de composés de dégradation dans l'huile de haut poids moléculaire (composés polaires) augmente la polarité du milieu de friture. Par conséquent, la viscosité du milieu de friture augmente ainsi que la quantité d'huile à la surface des aliments (Alim et Morton, 1974 ; Rimac-Brncic *et al.*, 2004).

Kita *et al.* (2005) maintiennent l'idée que l'absorption d'huile augmente avec le taux d'AGPI élevé, tandis que Vitrac en 2000 prouve le contraire. Ces contradictions montrent bien que la viscosité est un des facteurs les plus critiques menant à l'absorption d'huile plus élevée lorsque l'aliment est retiré de la friteuse, en raison de la diminution du drainage de l'huile à partir du produit frit.

Le vieillissement de l'huile

Le vieillissement d'une huile se caractérise visuellement par sa couleur et sa viscosité. La viscosité qui nous intéresse ici est le résultat de la formation de polymères, représentant la fraction polaire (CPT) la plus importante. Ils sont associés à l'auto-oxydation qui se produit par un mécanisme de radicaux libres (Bansal *et al.*, 2010), responsables de la baisse de la tension superficielle de l'huile.

2.3.5.4 Modification de la texture

La qualité d'un aliment (fruit ou légumes) est évaluée sur la base des perceptions sensorielles de l'homme sur les critères apparence, goût, arôme et texture (Chang et Chen, 2013). Pour le consommateur, la texture serait l'un des premiers critères sensoriel d'évaluation de la qualité (Qi *et al.*, 2000 ; Gibert *et al.*, 2010). Dans le fruit, c'est l'intégrité des composants de la cellule (paroi cellulaire et lamelle intermédiaire) et la pression de turgescence de cellule déterminée par la teneur en eau dans les vacuoles qui sont les facteurs les plus importants qui définissent la texture (Waldron *et al.*, 1997 ; Chassagne-Berces *et al.*, 2009).

Dans la friture profonde, Hubbard et Farkas (1999) ainsi que Baumann et Escher, (1995), rapportent dans leurs travaux que les vitesses élevées de transfert de chaleur qui ont lieu dans le processus, sont largement responsables des propriétés sensorielles recherchées par les consommateurs dans les produits frits (friabilité ou croustillance). La perception, description et quantification de la texture, peuvent se faire par le toucher ou par une sensation en bouche. La texture semble aussi fortement influencée par la teneur élevée en amidon contenu dans l'aliment, lequel se gélatinise au cours du chauffage (Andersson *et al.*, 1994 ; Pedreschi et Moyano, 2005). Pour Verlinden *et al.* (1995), la gélification de l'amidon dans la pomme de terre ne contribuerait que de façon limitée sur la texture qui dépend de la variété, de la cinétique de ramollissement et de la gélatinisation de l'amidon. D'après Biliaderis en 1991, mentionné par Hernandez-Jaimes *et al.*, (2013), l'amidon est organisé en

structure où la taille et la forme ainsi que les propriétés physico-chimiques et fonctionnelles sont spécifiques de l'origine de l'aliment.

Comme la pomme de terre, la banane plantain mature non mûre contient une haute teneur en amidon à hauteur de 86,5% (Gibert *et al.*, 2009). Cependant, très peu de données sont disponibles dans la littérature sur la texture des bananes vertes et mûres ayant subi un procédé de friture profonde (Eggleston *et al.*, 1991 ; Ngalani et Tchango Tchango, 1997 ; Qi *et al.*, 2000 mentionnés par Gibert *et al.*, (2010). La modification de texture du plantain se manifestera par une modification de l'état dans lequel se trouve l'amidon, dépendant de la température de gélatinisation.

2.3.5.5 Modification de couleur (réaction de Maillard)

La modification de couleur dans les aliments frais ou ayant subi un traitement thermique est due à une série de réactions complexes appelées réaction de Maillard. Cette réaction se manifeste dans les aliments avant et après traitement sans pour autant faire intervenir des réactions enzymes. Cette réaction de brunissement non enzymatique influe sur plusieurs aspects de la qualité des produits alimentaires tels que, la saveur, la couleur et la formation des arômes (Vinci *et al.*, 2012).

Plusieurs réactions sont impliquées dans la réaction de Maillard, mais nous ne retiendrons que les deux principales qui sont : le brunissement qui est définie par les réactions se produisant entre sucres lorsque ceux-ci sont soumis à des températures élevées. La réaction de Maillard (Maillard, 1912) proprement dite se manifeste par des réactions entre les sucres réducteurs tels que le fructose et le glucose et les protéines, acides aminés et des amides (Quayson et Ayernor, 2007).

Malgré le développement de couleur, d'arôme et de saveur, la réaction de Maillard s'est avérée être responsable du développement de substances potentiellement toxiques et mutagènes tels que l'acrylamide (Zyzak *et al.*, 2003 ; Elmore *et al.*, 2005 ; Yaylayan et Stadler, 2005), les furfurals et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (Gokmen *et al.*, 2006 ; Achir *et al.*, 2008). Tous ces composés participeraient au développement de maladies métaboliques et dégénératives (Förster *et al.*, 2005 ; Yamagishi *et al.*, 2005 ; Delgado-Andrade *et al.*, 2010). De nombreux composés, produits de la réaction de Maillard, sont quotidiennement consommés. C'est le cas du lait (Morales *et al.*, 1996), du pain (Ramírez-Jiménez *et al.*, 2000) ou le café (del Castillo *et al.*, 2002), le biscuit (Hendriksen *et al.*, 2009 ; Anese *et al.*, 2011) ainsi que les dérivés de pommes de terre (Tareke *et al.*, 2002).

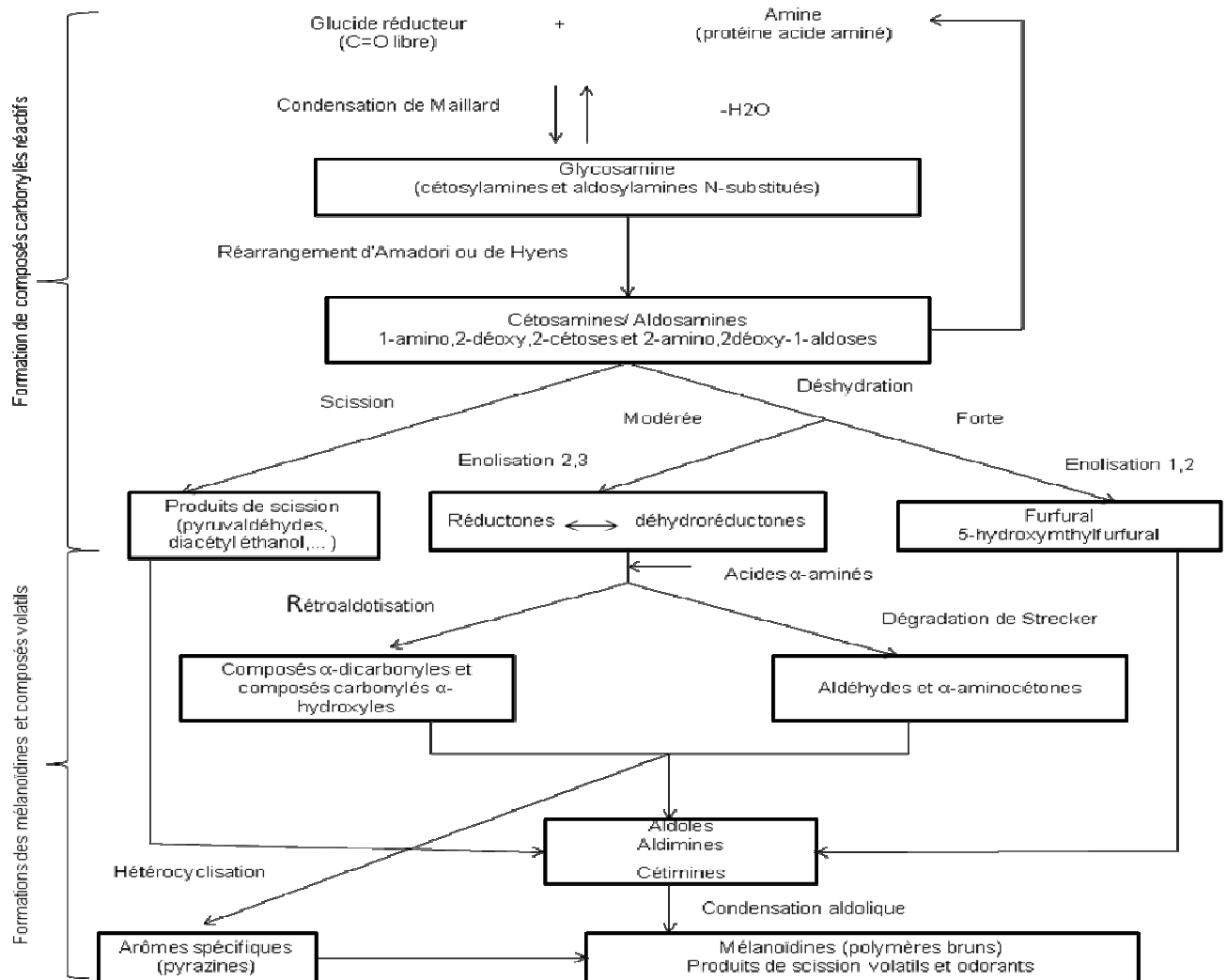


Figure 2-10 : Schéma simplifié de la réaction de Maillard adapté de Hodge (1953) et repris par Cheriot, 2007.

2.3.6 Modélisation des transferts lors de la friture

De nombreux auteurs dans la littérature ont proposé ces dernières années des modèles sur la modélisation des transferts de chaleur et de matière dans le cas de la friture. La plupart des modèles sont basés sur le principe de diffusion de tranfert de masse (excepté pour le transfert de l'huile) et d'énergie (Rice et Gamble, 1989 ; Ateba et Mittal, 1994 ; Moreira *et al.*, 1995 ; Dincer et Yildiz, 1996 ; Farkas *et al.*, 1996a ; Farkas *et al.*, 1996b ; Ni et Datta, 1999 ;

Southern *et al.*, 2000 ; Yamsaengsung et Moreira, 2002a ; Yamsaengsung et Moreira, 2002b ; Baik et Mittal, 2005 ; Sosa-Morales *et al.*, 2006 ; Nasiri *et al.*, 2011).

Farkas et ses collaborateurs (1996a ; 1996b) cités par Yamsaengsung et Moreira (2002a) et par Bassama *et al.* (2012), ont proposé à partir d'une étude réalisée sur des tranches de pommes de terre, un modèle sur les transferts de chaleur et de masse (cas de l'eau). Ils ont séparé la tranche de la pomme de terre en deux régions distinctes (la croûte et le cœur de la frite) et ont établi deux équations distinctes pour chacune des régions. Dans ce modèle, le flux de diffusion dans la région de la croûte et la pression entraînée par l'écoulement du liquide et de la vapeur dans la région du cœur, sont négligés.

Pour étudier le transfert d'eau par modélisation, plusieurs auteurs ont utilisé la loi de diffusion de Fick pour y aboutir (Saravacos et Charm, 1962 ; Kozempel *et al.*, 1991 ; Tong et Lund, 1993 ; Sankat *et al.*, 1996 ; Moreira *et al.*, 1999 ; Moyano et Berna, 2002 ; Pedreschi *et al.*, 2005 ; Sosa-Morales *et al.*, 2006 ; Adedeji *et al.*, 2009 ; Troncoso et Pedreschi, 2009 ; D Nasiri *et al.*, 2011).

Deux modèles (Adedeji *et al.*, 2009 ; Troncoso et Pedreschi, 2009 ; Nasiri *et al.*, 2011) ont été utilisés pour décrire la perte d'eau pendant la friture sous vide et la friture atmosphérique en considérant que le transfert s'effectue dans un sens unidirectionnel. Crank en 1975, a défini le premier modèle de diffusion de Fick qui est donné par l'équation suivante :

$$m_t = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad \text{Équation 2-1}$$

Où L est la moitié de l'épaisseur (m) ; M_t la valeur de la teneur en eau final (g d'eau / g base sèche, sans huile) ; m_0 est la teneur en eau initiale (g d'eau / g base sèche, sans huile) ; M_e est la teneur en eau à l'équilibre (g d'eau / g base sèche, sans huile), t est le temps de friture (s) et D_{eff} est le coefficient de diffusion (m^2/s).

Le second modèle, proposé par Pedreschi *et al.*, (2005), considère que le coefficient de diffusion de l'eau varie, ce qui donne lieu à l'équation suivante :

$$m_t = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-(2n+1)^2 \pi^2}{4(1+b)} \left(1 + \frac{D_0 t}{L^2}\right)^{1+b}\right) \quad \text{Équation 2-2}$$

Où D_0 est effectivement le coefficient de diffusion (m^2/s) à $t=0$ et b est la dimension du paramètre.

Les transferts d'huile sont étudiés dans le but de déterminer la quantité d'huile absorbée pendant la friture. Pour la modélisation de l'absorption de l'huile, de nombreux auteurs (Debnath *et al.*, 2003 ; Debnath *et al.*, 2009 ; Adediji *et al.*, 2009 ; Nasiri *et al.*, 2011) ont considéré le modèle de cinétique du premier ordre recommandé par Krokida *et al.*, (2000a ; 2000b ; 2001a ; 2001b).

$$d(Y)/dt = -K_Y (Y - Y_e) \quad \text{Équation 2-3}$$

Où Y_e est la teneur en huile à l'équilibre (Kg/Kg de base sèche) et K_Y est la constante de vitesse de l'huile (min^{-1}). A $t=0$, la teneur en huile est nulle, ce qui conduit à l'équation suivante :

$$Y = Y_e [1 - \exp(-K_Y t)] \quad \text{Équation 2-4}$$

D'autres auteurs dans leurs travaux ont fait appel à la loi d'Arrhénius pour décrire l'absorption d'huile (Moyano et Pedreschi, 2006). Elle est représentée par l'équation suivante :

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{Équation 2-5}$$

Où D_0 est le facteur pré-exponentiel de la loi d'Arrhenius (m^2/s), E_a est l'énergie d'activation (kJ / mol), R est la constante des gaz parfaits (kJ / mole K), et T est la température absolue (K).

2.3.7 Altérations des huiles de friture

Au cours du processus de friture, l'huile ou la graisse est exposée à une température élevée en présence d'air et d'humidité. Dans ces conditions, d'importants changements peuvent se produire (réactions d'hydrolyse, d'oxydation), entraînant la perte de la qualité de l'huile de friture et par la même occasion des aliments frits. Les modifications générales des principaux constituants des acides gras sont montrées dans le **tableau 2-8**, mais il n'est pas facile de prévoir le taux de dégradation des graisses étant donné le nombre élevé de variables impliquées dans le processus de friture (Dobarganes, 1998).

2.3.7.1 Phénomène d'oxydation

Au cours de l'opération de friture, des réactions d'oxydation se produisent en dehors du développement des caractéristiques de texture, de couleur et de saveur, recherchées par le consommateur. L'oxydation des lipides est reconnue comme étant l'une des causes majeure de la dégradation des aliments. Elle est amorcée par la présence d'AGPI en contact avec l'oxygène de l'air (Jeantet *et al.*, 2006). La conséquence la plus perceptible de l'oxydation des lipides est l'apparition d'odeurs et de flaveurs désagréables souvent qualifiées de rance (Villière et Genot, 2006 ; Jeantet *et al.*, 2006) qui conduit généralement au rejet de l'aliment car les propriétés sensorielles ont été modifiées. Il se forme aussi des composés volatils indésirables comme des aldéhydes, des cétones, des alcools, des hydrocarbures ainsi que des polymères, responsables de ces modifications.

L'oxydation des lipides peut également modifier la couleur ou affecter la texture des aliments, en raison de la réaction des protéines avec les produits d'oxydation (Genot *et al.*, 2003 ; Pokorny, 2003), ainsi que la valeur nutritionnelle des aliments en entraînant la perte d'acides gras essentiels, de vitamines et d'acides aminés indispensables (Jeantet *et al.*, 2006).

Les principaux mécanismes des phénomènes d'oxydation sont parfaitement décrits et les cinétiques et les facteurs de variation globalement bien connus (Villière et Genot, 2006 ; Labuza et Dugan, 1971 ; Frankel, 1980). L'oxydation des lipides est un enchainement de réactions radicalaires schématisées généralement en trois étapes ; l'initiation ou amorçage, la propagation et la terminaison décrits plus bas. Cependant les acides gras peuvent aussi subir un phénomène d'oxydation résultant de l'auto-oxydation, l'oxydation enzymatique et de la photo-oxydation.

D'après Tekaya et Hassouna, 2005, l'auto-oxydation dépend de plusieurs facteurs comme le degré d'insaturation de l'huile, les acides gras libres, la présence de traces métalliques et d'eau, la température ambiante, la teneur en oxygène et l'exposition à la lumière. La présence de pigments chlorophylliens, d'antioxydants naturels (bêta-carotène, tocophérols, phénols) contenus dans les huiles, peuvent aussi être responsables de la photooxydation (Rahmani et Saad, 1989 ; Perrin, 1992 ; Cheftel et Cheftel, 1992 ; Kiritsakis et Osman, 1995 ; Boskou *et al.*, 1996 ; Rahmani, 2000).

Initiation

L'initiation est la première étape de l'autooxydation des lipides qui consiste en la formation d'un radical libre (alkyle de symbole R[•]) suite à l'arrachement d'un atome d'AGI (Villière et Genot, 2006 ; Jeantet *et al.*, 2006). Cette réaction est très lente au départ, justifiée par la

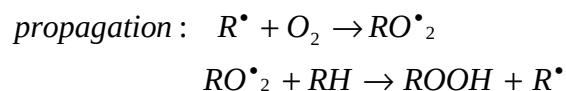
faible absorption de l'oxygène mais peut être accélérée par chauffage (thermolyse), par la lumière (photolyse), les radiations ioniques, la présence d'ions métalliques polyvalents et certaines enzymes (Villière et Genot, 2006 ; Jeantet *et al.*, 2006).

Ci-dessous sont représentées les équations de réaction pendant la phase d'initiation :



La propagation

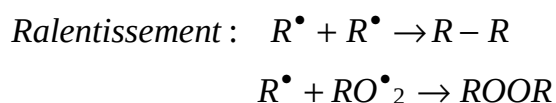
Au cours de la seconde phase de l'autoxydation (propagation), l'oxygène réagit avec les radicaux alkyles précédemment formés pour former à leur tour des radicaux peroxyde ($ROO^{\bullet}$). Cette réaction est rapide du fait de l'absorption de l'oxygène qui s'intensifie et les mécanismes radicalaires en chaîne, s'accélèrent. Ces radicaux peroxydes ($ROO^{\bullet}$) réagissent à leur tour avec des acides gras et forment des hydroperoxydes ($ROOH$) et de nouveaux radicaux alkyle. Les hydroperoxydes, produits primaires de la réaction, sont des molécules instables. Ils se décomposent sous l'effet de la chaleur ou des métaux en donnant naissance à des produits secondaires (composés volatils) et représentent la cause principale de l'altération du goût et de l'odeur de l'huile (Fazzalari, 1978 ; Grosch, 1982 ; Ranalli, 1989 ; Cheftel et Cheftel, 1992).



La terminaison

Des composés de plus haut poids moléculaire comme des dimères ou des oligomères dont les ponts sont constitués de fonctions éthers ou peroxydes peuvent ainsi se former. La concentration en radicaux libres devient suffisamment importante et ces derniers se combinent pour former des composés non radicalaires (Jeantet *et al.*, 2006).

Cependant, la terminaison reste une étape difficile à cerner car il n'existe aucune méthode de maîtrise parfaite du phénomène d'oxydation des lipides, qui s'entretient au cours du temps.



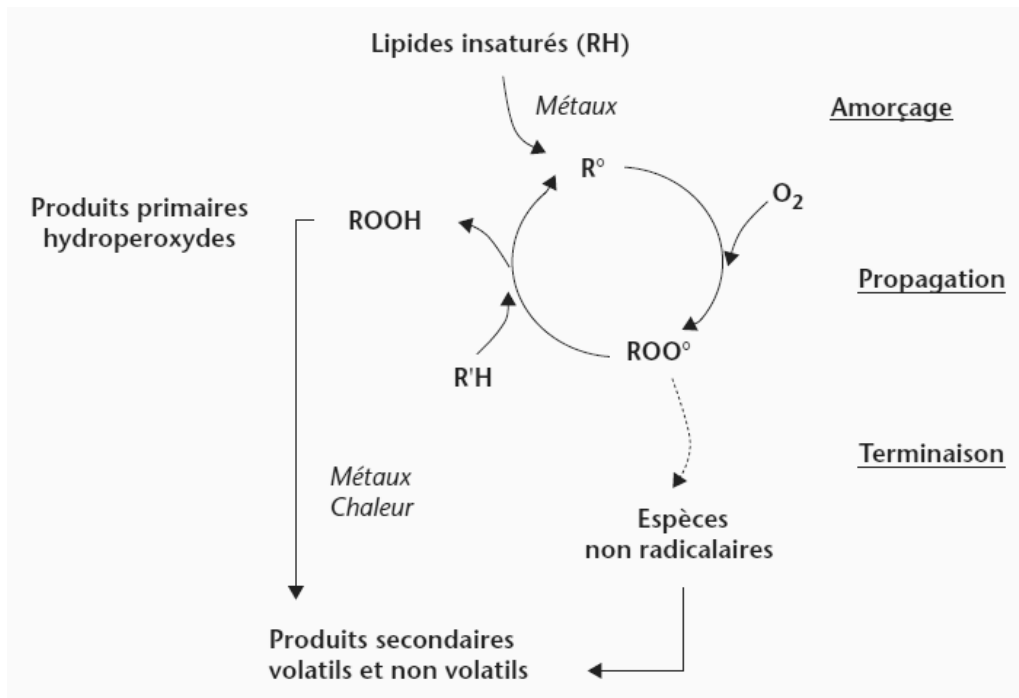


Figure 2-11 : Représentation schématique du mécanisme réactionnel de l'auto-oxydation des lipides (Villière et Genot, 2006).

2.3.7.2 Hydrolyse

Les mécanismes d'hydrolyse sont communs aux protéines, lipides et glucides. Lors du procédé de friture, l'eau apportée par l'aliment peut provoquer une hydrolyse partielle de l'huile avec libération d'acides gras libres et de glycérides partiels (Dobarganes *et al.*, 2000a ; 2000b), voire de glycérol pouvant en conditions très drastiques conduire à la production d'acroléine. Le dégagement de vapeur d'eau entraîne des composés volatils oxydés responsables de l'odeur caractéristique d'huile chauffée (Combe et Rossignol-Castera, 2010). Certains auteurs (Kulkarni et Dalai, 2006 ; Lam *et al.*, 2010), évoque la participation de l'eau non évaporée dissoute dans l'huile ou la graisse, qui induirait la rupture des liaisons pour donner du glycérol, des monoglycérides et diglycérides en concentrations variées.

2.3.7.3 Polymérisation, isomérisation et cyclisation

En parallèle, les acides gras insaturés oxydés ou non, peuvent aussi se polymériser, se couper ou se cycliser. Les doubles liaisons peuvent se déplacer ou se modifier pour former

des acides gras conjugués ou *trans* (Combe et Rossignol-Castera, 2010). L'ensemble des composés polymérisés présents dans le bain d'huile va avoir pour conséquence une augmentation de la viscosité de l'huile (Santos *et al.*, 2005). La réaction de cyclisation a lieu au cours de la friture ou du raffinage au dessous de 200°C (Sebedio et Grandgirard, 1989). Il se forme dans ces conditions des composés appelés acides gras cycliques monomères (Zhang *et al.*, 2012) qui sont considérés comme les composés les plus toxiques formés durant le procédé de friture, car ils sont facilement absorbés par la muqueuse intestinale (Sebedio et Grandgirard, 1989 ; Romero *et al.*, 2006) même s'ils sont présent à faible dose dans le produit frit (Romero *et al.*, 2000a). Ce type de réaction attaque les liaisons C=C *cis* de la chaîne aliphatique de l'acide gras.

2.3.8 Les produits formés au cours du vieillissement de l'huile

Au cours du chauffage à haute température des huiles et des graisses en présence d'air, les réactions d'oxydation et d'hydrolyse qui ont lieu conduisent à la formation de nouveaux produits complexes et indésirables (Chang *et al.*, 1978 ; Gasparoli, 1998 ; Nawar, 1998 ; Dobarganes *et al.*, 2006 ; Berdeaux *et al.*, 2012).

2.3.8.1 Formation d'acrylamide

La formation de l'acrylamide a lieu au cours de la réaction de Maillard (Mottram *et al.*, 2002). Cette réaction, dite de brunissement non enzymatique influe sur plusieurs aspects de la qualité des produits alimentaires tels que, la saveur, la couleur et la formation d'arômes (Coughlin, 2003 ; Vinci *et al.*, 2012). A température de friture élevée, un acide aminé, l'asparagine réagit avec les sucres pour produire l'acrylamide (Quayson et Ayernor, 2007). Le mécanisme majeur de la formation de l'acrylamide implique donc la réaction d'un composé carbonylé (de préférence une alpha-hydroxycarbonyle) avec l'asparagine, qui est un acide aminé important des pommes de terre et des céréales. Cet acide aminé participe à la formation de l'acrylamide par réaction de Maillard à des températures supérieures à 100°C (Friedman, 2003 ; Becalski *et al.*, 2003 ; Rufian-Henares et Morales, 2006). De cette réaction s'en suit la formation du glycosylamine N-substitué et la formation d'une base de Schiff décarboxylée après déshydratation aux températures élevées (Zyzak *et al.*, 2003 ; Stadler et Scholz, 2004 ; Vinci *et al.*, 2012).

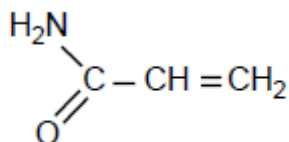


Figure 2-12 : structure de l'acrylamide (Claeys *et al.* , 2005)

Tareke et ses collaborateurs (2002) montrent la formation d'acrylamide pour des températures au-dessus de 120°C dans certains aliments riches en amidon, telles que les chips de pomme de terre, les frites françaises, le pain et les céréales transformées. Cependant, certains auteurs montrent qu'en abaissant la température de friture de 185 à 165°C à la pression atmosphérique lors de la friture de chips de pomme de terre, il était possible de réduire la formation d'acrylamide (Haase *et al.*, 2003 ; Pedreschi *et al.*, 2004 ; Pedreschi *et al.*, 2006 ; Pedreschi *et al.*, 2007). Sa concentration dans les frites de pommes de terre est estimée entre 224–3700 µg/kg (Tareke *et al.*, 2002) et de 2000 µg/kg, particulièrement dans les frites françaises (Gokmen *et al.*, 2006 ; Pedreschi *et al.*, (2006) mentionnés par Romani *et al.*, 2009).

La majorité des produits de grignotage, du type « chips » ou « frite » sont issus des produits amyliques tels que la pomme de terre, la banane et le plantain, la patate douce, l'igname, etc. la banane plantain contient une quantité élevée de sucres réducteurs (glucose, fructose) qui varient en fonction du stade de maturité. Il a été démontré par Yaylayan et Stadler, (2005), que les composés carbonyles α-hydroxyacides, tels que le fructose ou glucose, sont beaucoup plus efficaces que d'autres, en raison de l'effet de diminution de l'énergie d'activation (Claus *et al.*, 2008). Daniali et ses collaborateurs en 2013 ont étudié l'influence du stade de maturité de deux variétés de bananes sur la production d'acrylamide dans la friture des beignets de banane. Dans les deux cas, la quantité d'acrylamide a augmenté en fonction du taux de sucres réducteurs (glucose et fructose). L'acrylamide a été classé comme cancérigène probable chez l'homme (Rosén et Hellenäs, 2002 ; Tareke *et al.*, 2002 ; Pedreschi *et al.*, 2007 ; Quayson et Ayernor, 2007) et neurotoxique chez les animaux (Quayson et Ayernor, 2007). Il aurait également des effets génotoxiques et neurotoxiques (Friedman, 2003). Certains auteurs ont essayé d'estimer la consommation quotidienne moyenne d'acrylamide chez le consommateur qui serait autour de 0,4-0,5 mg / kg de poids corporel (Dybing et Sanner, 2003 ; Konings *et al.*, 2003 ; Svensson *et al.*, 2003 ; Boon *et al.*, 2005 ; Dybing *et al.*, 2005).

2.3.8.2 Libération des composés volatils

Lors des opérations de friture répétées à haute température et en présence d'oxygène atmosphérique, des composés de nature volatils et non-volatils apparaissent dans l'huile de friture. Comme l'indique leur nom, les composés volatils se dissipent au cours du processus de friture, tandis que les composés non volatils, restent présents dans l'huile de friture et dans le produit frit (Masson *et al.*, 1997 ; Masson *et al.* , 1999 ; Ghidurus *et al.*, 2010 ; Debnath *et al.*, 2012). Ces composés sont la résultante des phénomènes d'oxydation thermique et de la polymérisation d'acides gras insaturés (Chang *et al.*, 1978). Les composés volatils oxydés libérés sont responsables de l'odeur caractéristique d'huile chauffée (Combe et Rossignol-Castera, 2010), de saveurs désagréables et de la réduction de la durée de conservation (Fullana *et al.*, 2004a ; 2004b ; Katragadda *et al.*, 2010).

La quasi-totalité d'entre eux sont issus de l'oxydation des acides linoléique et oléique, AGI majoritaires des huiles végétales (Grosch, 1982 ; Frankel, 1982 ; Frankel, 1985 ; Grosch, 1987 ; Keszler *et al.*, 2000 ; Villière et Genot, 2006). La majeure partie de ces composés volatils est constituée d'aldéhydes (Katragadda *et al.*, 2010).

2.3.8.3 Apparition des composés *trans*

On trouve dans la nature et en majorité, les acides gras insaturés de configuration *cis* (voir **tableau 2-4**). C'est le cas de l'acide oléique (18:1 n-9), l'acide linoléique (18:2 n-6), l'acide alpha-linolénique (18:3 n-3), ainsi que leurs dérivés supérieurs, tels que les acides arachidonique pour la famille n-6, eïcosapentaénoïque (EPA) ou docosahexaénoïque (DHA) pour la famille n-3. Cependant, au cours de la friture il se passe dans les huiles insaturées un changement de position des doubles liaisons qui passent de la conformation *cis* à *trans*. Chardigny et Malpuech-Brugere (2007a) montrent que cette évolution change la structure dans l'espace, les propriétés physicochimiques, mais aussi le métabolisme et l'impact de ces acides gras sur différentes fonctions. C'est notamment pour cela que Mensink *et al.* (2003) ; Lopez-Garcia *et al.* (2005) ; Mozaffarian *et al.* (2006) pensent que les AGT peuvent avoir des effets indésirables sur la santé humaine.

En 1990, Mensink et Katan, ont en effet montré que la consommation d'AGT issus de l'hydrogénation des huiles végétales, consommés à hauteur de 11 % de l'apport énergétique, induisait une augmentation du LDL-cholestérol (comme avec les AG saturés), mais aussi une diminution du HDL cholestérol, ce qui suggère que les AGT étaient plus délétères que les AG saturés (Chardigny et Malpuech-Brugere, 2007b). Plusieurs études du

même type, mais avec des niveaux d'apport plus faibles en AGT ont ensuite été rapportées. Elles ont toutes été reprises dans la méta-analyse de Mozaffarian *et al.*, (2006). Les résultats montrent que les AGT sont responsables d'une augmentation de la concentration sérique du cholestérol-LDL (C-LDL = low density lipoprotein) souvent associée à une diminution du cholestérol-HDL (CHDL= high density lipoprotein) et une augmentation du rapport cholestérol total/C-HDL, l'ensemble correspondant à un profil lipidique dit athérogène (Mozaffarian *et al.*, 2006 ; Mozaffarian et Clarke, 2009).

2.3.8.4 Formation de composés polaires

Les composés polaires totaux (CPT) (ou total polars materials (TPM) en anglais) sont considérés comme l'une des méthodes d'évaluation des huiles altérées (Yoon *et al.*, 1985 ; Dobarganes *et al.*, 2000 ; Bhattacharya *et al.*, 2008). Ces composés polaires constituent la fraction des nouveaux composés indésirables non-volatils accumulés dans l'huile lors des traitements de friture (Juárez *et al.*, 2011). Leurs poids moléculaires est supérieur aux triglycérides non oxydés (Dobarganes, *et al.*, 1988 ; 1989 ; Farhoosh et Tavassoli-Kafrani, 2010 ; Juárez *et al.*, 2011), d'où la nécessité de connaître le degré d'altération de ces huiles.

De nombreux pays ont mis en place la limite maximale de composés polaires à 25-27% (Paul *et al.*, 1997 ; Andrikopoulos *et al.*, 2003 ; Juárez *et al.*, 2011 ; Farhoosh *et al.*, 2012). D'autres l'ont fixé à 24% (Billek *et al.*, 1978 ; Gertz, 2000 ; Debnath *et al.*, 2012). De nombreuses méthodes permettent de les quantifier globalement parmi lesquelles on retrouve l'analyse chromatographique sur colonne de silice (Hein *et al.*, 1998 ; Clodoveo *et al.*, 2007). Pour séparer et quantifier les TPM, plusieurs auteurs (Caponio *et al.*, 2007 ; Summo *et al.*, 2008 ; Farhoosh et Tavassoli-Kafrani, 2010 ; Bansal *et al.*, 2010 ; Caponio *et al.*, 2011 ; Juárez *et al.*, 2011 ; Marmesat *et al.*, 2012) ont fait appel à la chromatographie haute performance à exclusion de taille. Ces classes de TPM sont issus l'oxydation et l'hydrolyse des triglycérides (Caponio *et al.*, 2007). Ces composés sont classifiés en : triglycérides oligopolymers (TGP), triglycérides oxydés (ox-TG), triglycérides dimères (TGD), triglycérides oxydés monomères (ox-TGM), diglycérides (DG) et acides gras libre (AGL). Márquez-Ruiz et Dobarganes en 1997 cités par Farhoosh *et al.*, (2009) suggèrent que les teneurs en DG et AGL sont liées au phénomène d'hydrolyse, les oxTGM au phénomène d'oxydative et finalement les TGD et TGP sont l'objet d'une altération thermique. Puisque les TPM sont le résultat des réactions d'oxydation, d'hydrolyse, de polymérisation, isomérisation et la cyclisation au cours du procédé de friture, ils contribuent à la perte de la valeur organoleptique et nutritionnelle (décomposition des acides gras essentiels) de l'huile.

Lorsqu'une telle huile est consommée par l'homme, des effets nutritionnels et physiologiques se répercutent sur l'organisme.

2.4 MAITRISE DES TECHNIQUES DE SUIVI DU VIEILLISSEMENT DES HUILES DE FRITURE PROFONDE

2.4.1 Aspects législatifs

La législation des pays européens recommande de changer l'huile lorsque le pourcentage en composés polaires est supérieur à 25%. La réglementation française a fixé un seuil en composés polaires de 25%, valeur qui a fait l'objet d'un décret 86.857 du 18 juillet 1986, accompagné d'un arrêté du 1^{er} octobre 1986 fixant la méthode d'analyse et déclare les huiles impropres à la consommation au dessus de cette valeur (Olle, 1998). Depuis cette date, pratiquement tous les pays européens ont mis en place une réglementation (voir tableau 2-7).

Tableau 2-7: Situation de la réglementation française et européenne (Olle, 1998)

	Température d'utilisation	Acidité	Point de fumé	Composés polaires	Polymères de triglycérides	Textes
Allemagne		<2,5	>170°C	<27%		Recommandation DGF 1979
Autriche	Max : 180°C	<2,5	>170°C			
Belgique	Max : 180°C	<5		<25%		Arrêté royal du 22/01/88
Danemark	PAS DE REGLEMENTATION NI DIRECTIVE					
Espagne				<25%		
Hongrie				<30%		
Italie	Max : 180°C			<25%		
Pays-bas					<15%	
Portugal	Max : 180°C			<25%		
Suisse				<27%		
Suède	GUIDE D'UTILISATION					
Norvège	C22 :1 <5%					
France	C18 :3 <2%			<25%		18/07/86

Un autre décret concernant la nature de l'huile a été mis au point, définissant deux types d'huile. C'est le décret 73.139 du 12.02.73, chapitre IV qui définit que lorsqu'une huile ou graisse végétale est :

- Inférieure à 2% en acide linoléique, elle est recommandée pour friture et assaisonnement ;
- Supérieure à 2% en acide linoléique, elle est recommandée uniquement pour assaisonnement.

Cette distinction de la nature de l'huile n'est plus à considérer comme étant un facteur limitant son utilisation aussi bien que la protection sanitaire du consommateur, au vu des connaissances scientifiques actuelles. En conséquence, ce critère peut être abandonné vu le nombre exorbitant des huiles végétales commercialisées à ce jour.

En 2008, un nouveau décret n° 2008-184 du 26-02-2008, fixe et recommande les valeurs limites en CPT à 25% et en polymères triglycérides (TGP) afin que ces seuils ne soient pas atteints que ce soit dans les ménages ou en industrie lors des pratiques en friture (Combe et Rossignol-Castera, 2010). Morin (2005), précise dans ses travaux que le Danemark a fixé une réglementation qui est entrée en vigueur en juin 2003 dans laquelle la limite en AGT est de 2% pour les lipides totaux dans tous les produits alimentaires. De même, aux Etats-Unis et au Canada, leur indication sur l'emballage est entrée en vigueur dès le 1^{er} janvier 2006.

2.4.2 Les matériels utilisés (capteurs)

Actuellement, de nombreux équipements de mesure des composés polaires totaux sont mis sur le marché. Ces appareils permettent d'avoir une idée sur le degré de dégradation de l'huile sans faire appel à des méthodes chimiques longues et parfois complexes. Bansal et ses collaborateurs (2010), ont inventorié une liste des kits ou capteurs les plus couramment utilisés avec leur mode de fonctionnement afin d'évaluer la qualité de l'huile. Ces capteurs sont :

- FASafe™ (MP Biomedicals, USA) pour mesurer les AGL (en % d'acide oléique).
- 3M™ Low Range Shortening Monitor (3M, USA) pour mesurer les AGL (en % acide oléique) sur des bandelettes.
- Oxifrit-Test ® (Merck, Germany) pour évaluer les CPT.

- Fritest ® (Merck, Germany) pour la détection de composés carbonylés dans les échantillons d'huile.
- TPM Veri-Fry ® (Test Kit Technologies Inc., USA) pour évaluer les CPT.
- CapSens 5000 (Centre de technologie de l'information chimique, Suisse) pour évaluer les CPT.
- FOM 310 (Ebro Electronics, Allemagne) pour évaluer les CPT.
- Testo 265 (Testo Inc., USA) pour évaluer les CPT.

A coté de ces capteurs, on peut ajouter le sensing electronic nose (4100 vapour analysis system, Electronic Sensor Technology, New Bury Park, USA) qui détecte les odeurs (Gan *et al.*, 2005). Parmi les capteurs cités plus haut, certains auteurs ont eu à les utiliser pour évaluer rapidement la qualité de l'huile (Xu *et al.*, 1999 ; Sánchez-Gimeno *et al.*, 2008) ; Juárez *et al.*, 2011).

3 PLAN D'EXPERIENCES

3.1 INTRODUCTION :

La Méthodologie des Surfaces de Réponses (MSR) est une technique multivariée reconnue pour être efficace pour identifier et optimiser des paramètres dans un procédé, à partir de quelques essais expérimentaux. La MSR permet de générer des modèles mathématiques empiriques qui permettent d'évaluer la pertinence du modèle. Elle permet également, grâce à l'analyse statistique, d'évaluer les principaux effets des facteurs étudiés ainsi que des interactions ayant lieu entre les facteurs. Les principaux objectifs de cette application permettent d'optimiser et de valider les résultats nécessitant moins d'efforts, de temps et de ressources en cours de procédé (Cornell, 2011). Avant toute application de la RSM, il est recommandé de définir la problématique et de définir la nature des variables (paramètres et réponses) entrant en jeux. Bezerra *et al.*, (2008) ont énuméré de façon succincte la démarche à suivre en six étapes pour mener à bien la méthode RSM :

- ✓ Choix des variables indépendantes (par test de dépistage) et définition du domaine expérimental ;
- ✓ Choix de la conception de la matrice et réalisation des expériences générées par la matrice ;

- ✓ Traitements mathématiques et statistiques des données expérimentales en passant par l'équation polynomiale empirique ;
- ✓ Analyse de la validité du modèle ;
- ✓ Vérification de la nécessité et possibilité d'effectuer des déplacements en direction de la région optimale ;
- ✓ Obtention des valeurs optimales pour chaque variable étudiée sur les graphes d'iso réponse.

3.1.1 Choix des facteurs

Le nombre de facteurs indépendants dans l'optimisation d'un procédé quelconque peut varier de deux à plus. Pour éviter l'utilisation d'un grand nombre de facteur, et surtout connaître ceux qui peuvent influencer le bon fonctionnement d'un procédé, il est souhaitable et recommandé de réaliser des tests de dépistage encore appelés test de criblage où « screening » en anglais. Deux types de matrices sont souvent utilisés dans le criblage. Il s'agit principalement de la matrice d'Hadamard (développée par Plackett & Burman, 1946) qui est matrice factorielle fractionnée à deux niveaux et de la matrice factorielle complète à deux niveaux (Bezerra et *al.*, 2008 ; Hibbert, 2012 ; Sakkas, Islam, Stalikas, et Albanis, 2010).

Selon (Hibbert, 2012), il est possible de se passer du test de criblage lorsqu'un facteur (à l'issue de la littérature) est connu pour avoir un effet significatif sur le procédé. Celui peut immédiatement être inclus comme facteur pour l'optimisation.

En dehors du choix des facteurs, le choix du niveau à affecter à un facteur est important. Une étude préliminaire basée sur la littérature peut s'avérer être d'une grande aide pour pouvoir estimer les niveaux haut et bas d'un facteur.

3.1.2 Choix de la RSM

Au cours de cette étude nous avons utilisé une matrice de Doehlert qui présente de nombreux avantages. Cette matrice a été développée par Doehlert en 1970 (Doehlert, 1970). Elle présente des niveaux hétérogènes et laisse le libre choix d'affecter le nombre de niveau à chacun des facteurs étudiés, ainsi que certains avantages par rapport aux autres matrices. Il s'agit particulièrement :

- ✓ Du nombre réduit d'expériences à réaliser qui se détermine par : $N > K^2 + K + C_p$ où K est le nombre de variable, C_p le nombre de répétition des points au centre du domaine.
- ✓ La distance entre les niveaux des variables est uniforme
- ✓ Possibilité de projeter la matrice expérimentale dans une zone expérimentale en utilisant les précédents points adjacents.

Tous ces avantages font que l'utilisation de cette matrice a augmenté ces dernières années. Son inconvénient est que c'est une matrice qui n'est pas rotative comme la matrice composite centrée ou la matrice de Box-benken (Hibbert, 2012).

Le plus souvent, le modèle mathématique utilisé dans la RSM afin de décrire les différents effets (linéaire, quadratique et d'interaction) des facteurs sur une réponse, est le modèle décrit par l'équation polynomiale du second ordre exprimé comme suit (Poonkuzhali et Palvannan, 2011):

Equation :
$$\eta_j = \beta_{j0} + \sum_{i=1}^n \beta_{ji} X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{jii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{jii} X_i X_j$$
 Équation 3-1

Où Y est la réponse prévue, b_0 le coefficient constant, b_i le coefficient linéaires, b_{ij} les coefficients d'interaction, b_{ii} quadratique et les termes x_i , x_j sont les valeurs codées des variables dépendantes.

L'effet linéaire de la réponse est exprimé par le deuxième terme de l'équation est typique d'un modèle du premier ordre tout comme les termes d'interactions. Ces modèles du premier ordre s'avèrent toujours être insuffisant pour analyser l'influence des facteurs indépendants sur les réponses. C'est pourquoi on requiert à utiliser l'équation polynomiale du second ordre en faisant intervenir des termes quadratiques qui, grâce à l'ensemble des termes permettra de déterminer le point critique.

Après la réalisation de la série des expériences, l'optimisation des variables indépendantes au cours d'un procédé donnant les meilleurs résultats d'une réponse doit être faite. Elle est réalisable à partir des analyses mathématiques et statistiques qui découlent de l'application de la RSM. La phase d'optimisation peut se faire par le tracé de la courbe de réponse en deux ou trois dimension, ou sur le chemin optimal, prenant en compte l'ensemble des effets et des interactions des différents facteurs sur la réponse étudiée.

Les tableaux ci-dessous résument quelques travaux antérieurs sur l'application de la méthodologie des surfaces de réponse.

Tableau 3-1 : Application des matrices pour optimiser des paramètres et/ou un procédé : cas de la friture profonde (a)

Nom de la matrice	Echantillon	Réponses évaluées	Facteurs indépendants	Objectif de l'étude	Références
Centrale composite	Pommes rouges	- Force de rupture - Teneur en huile - Teneur en humidité - Différence de couleur (ΔE)	- Température - Temps de friture sous vide - Concentration de la solution d'immersion de fructose	Optimiser les conditions de friture sous vide	Shyu et Hwang, 2001
Box- Behnken	Tranches de pommes de terre (<i>Solanum tuberosum</i>) blanchies et séchées	- Volume de chips frites - Teneurs en huile et en eau	- Température - Temps de friture - Concentration de la solution d'enrobage de gomme de caroube	Etude des effets des facteurs indépendants sur la qualité des chips de pomme de terre : optimiser l'enrobage et les conditions de friture	Blibech <i>et al.</i> , 2013
Box- Behnken	Fruit du kiwi	- Texture - Teneurs en huile et en humidité	- Température et temps de friture sous vide - Concentration de la solution de maltodextrine	Etude des effets du %MD dans le prétraitement d'échantillon, de la température et le temps de friture utilisée pendant la friture sous vide	(Diamante <i>et al.</i> , 2012)
Taguchi	Pommes de terre (<i>Solanum tuberosum</i>)	- Dureté - Couleur - Teneurs en huile et eau	- Puissance du micro-onde - Temps de friture - Type d'huile	Optimiser les conditions de friture au micro-onde ainsi que la comparer à la friture conventionnelle.	Oztop <i>et al.</i> , 2007

Tableau 3-2 : Application des matrices pour optimiser des paramètres et/ou un procédé : cas de la friture profonde (b)

Nom de la matrice	Echantillon	Réponses évaluées	Facteurs indépendants	Objectif de l'étude	Références
Box–Behnken	Cossettes d'igname (<i>Dioscorea rotundata</i>)	- Profil de texture - Apparence	- Température - Temps de blanchiment - Durée de friture	Evaluer des effets des conditions du blanchiment et de la friture sur le profil de texture et de couleur	Graham-Acquaah <i>et al.</i> , 2014
Centrale composite	Tranches d'igname (<i>Dioscorea rotundata</i>)	- Force de rupture - Teneur en huile - Teneur en humidité - Couleur (L*,a* et b*)	- Température - Temps de friture - Matière sèche initiale	Optimiser les conditions de friture	Sobukola <i>et al.</i> , 2008)
Plan factoriel complète à 3 niveaux	Craquelins de manioc	- Teneur en humidité - Densité apparente - Expansion linéaire - Forces de pénétration Emission de son	- Température - Temps de friture	Etude des effets des facteurs indépendants sur les attributs de craquelins	Saeleaw et Schleining, 2011
Box-Behnken	Nouilles instantanées	- Absorption d'huile - Qualité de cuisson - Propriétés de texture - Acceptabilité globale	- Temps de mélange - Epaisseur de la feuille de pâte - Temps de cuisson à la vapeur - Température - Temps de friture	Production de meilleurs nouilles	Gulia et Khatkar, 2013
Box-Behnken	Tranches d'abricot	- Teneurs en huile - Humidité - bêta-carotène	- Température - Temps de friture sous vide - Concentration de la solution de maltodextrine	Etude des effets du %MD sur le prétraitement de l'échantillon, la température et le temps pendant la friture sous vide	Diamante <i>et al.</i> , 2012

MATERIEL ET METHODES

4 MATERIEL ET METHODES

Les mécanismes de transfert de chaleur et de matière ainsi que l'apparition de produits indésirables issus des réactions de dégradation thermique et oxydative au cours du procédé de friture ont été étudiés à la fois sur de la banane plantain mûre et sur trois huiles de friture de compositions différentes.

Ce chapitre présente le procédé de friture profonde de la banane plantain mûre et détaille plus particulièrement les protocoles d'analyses physico-chimiques du plantain et des huiles de friture.

4.1 MATERIEL

4.1.1 La banane plantain

La banane plantain utilisée pour cette étude appartient au groupe *Musa* AAB, du type Faux Corne, variété « *Hartòn* ». Les bananes, en provenance de Colombie, sont achetées dans un magasin à Nancy au stade de maturité 5-6. Elles sont stockées dans un carton dans un endroit propre et sec à température ambiante. Les changements de maturité se poursuivent jusqu'au stade 7, avant d'effectuer ce travail.

Parage du plantain en cylindres

Trente minutes avant le traitement, les bananes plantains mures sont lavées, essuyées, épluchées et découpées en tranches de $10,0 \pm 0,2$ mm d'épaisseur grâce à une trancheuse électrique domestique de marque SEB, (France). A l'aide d'un emporte-pièce, les morceaux de plantain ont été uniformisés à $30,0 \pm 0,2$ mm de diamètre, avec une masse moyenne de $8,95 \pm 0,20$ g.

4.1.2 Les huiles de friture

4.1.2.1 L'huile Frial

L'huile Frial utilisée comme huile de friture est un mélange d'huiles de colza, de tournesol oléique, de pépins de raisins et d'huile de coriandre (Lesieur, France). Elle a été considérée comme référence pour notre travail.

4.1.2.2 L'huile de soja

L'huile de soja a été choisie en raison de sa consommation importante au Congo Brazzaville et particulièrement à Pointe-noire où elle largement consommée en raison de sa disponibilité. Elle est utilisée dans les ménages, les restaurants, et petits restaurateurs de fast foods (beignets de farine, patate douce et plantain) comme huile pour la friture, cuisson simple et assaisonnement. Elle est aussi disponible sur le marché de Brazzaville et malgré son prix plus élevé, comparé à l'huile de palme raffinée, les consommateurs la préfèrent en raison de la saveur qu'elle apporte dans les plats. L'approvisionnement de cette huile sur le marché se fait par importation des États-Unis, premier producteur mondial.

4.1.2.3 L'huile de palme raffinée

L'huile de palme raffinée, semi-solide à température ambiante, est l'huile alimentaire la plus consommée au Congo-Brazzaville en friture, assaisonnement et en cuisson simple. Elle provient principalement de Malaisie, fournisseur à raison de 2/3 de la production. Une grande partie de la population (plus de 2/3) à Brazzaville et des zones provinciales, consomme cette huile en raison de sa disponibilité sur le marché et son prix au litre attractif, comparable aux autres huiles raffinées comme les huiles de soja, de colza ou d'huile d'olive.

4.1.3 L'équipement de friture

La friteuse (figure en annexe) est utilisée avec l'ensemble des huiles de soja et palme raffinées. Les caractéristiques de cette friteuse ménagère sont les suivantes : friteuse ménagère à forme ronde avec une cuve en aluminium (de type filtra ® one, modèle de série F52-1, SEB, France) de dimension 34 x33 x 26 cm, remplie jusqu'à environ 2,1 Litres soit 1,89 Kg ; un panier grillagé en acier inoxydable permettant l'immersion de 1,2 Kg de frites et dispose d'un tamis filtrant. Elle a une résistance soudée sous la cuve avec une puissance de 1900 watts. Pour contrôler la température de friture et suivre les cinétiques de température, une sonde de température, plongée dans le bain d'huile et reliée à un thermomètre digital de marque ALMEMO® 2290-4 V5 AMR, permet d'enregistrer les variations de température. Les données sont collectées à l'aide du logiciel AMR V5 (Ahlborn Meß- und Regelungstechnik, GmbH, série H02030452M).

4.1.4 Procédure expérimentale de la friture de la banane plantain suivant un plan d'expériences

Pour estimer les coefficients du modèle prévisionnel, nous avons choisi d'utiliser les réseaux uniformes de Doehlert, (1970) qui ont l'avantage de présenter des propriétés très intéressantes. Ce type de matrice, générée à partir d'un simplexe, présente une distribution uniforme des points expérimentaux dans l'espace des facteurs normés, augmentant ainsi la qualité du modèle prévisionnel. Le nombre d'expériences (N) à réaliser est déterminé par le nombre de paramètres (k) pris en compte :

$$N \geq k^2 + k + 1 \quad \text{Équation 4-1}$$

Une des qualités remarquables de cette matrice est la possibilité d'attribuer des niveaux distincts aux différentes variables: la première variable comporte 5 niveaux, la dernière est à 3 niveaux et toutes les autres variables intermédiaires présentent 7 niveaux. En fonction des contraintes techniques et économiques imposées par le système, il est possible de planifier la matrice d'expériences.

A partir de la liste non exhaustive des facteurs susceptibles d'agir sur le procédé de friture profonde, nous avons retenu 3 facteurs influents :

- la température : 5 niveaux de valeurs comprises entre 160 et 180°C sont attribués à cette variable.
- le temps de friture : 7 valeurs différentes sont retenues avec un domaine de variation compris entre 1 et 4 minutes.
- la quantité de plantain : 3 niveaux sont attribués à ce facteur variant de 160 à 200 g par friture.

Nous avons généré une matrice de Doehlert comprenant 13 essais distincts où les conditions expérimentales varient de manière programmée (**tableau 4-2**).

Des répétitions d'expériences (exp 14, 15, 16) ont été réalisées pour déterminer l'erreur expérimentale (analyse de la variance), erreur qui est intégrée dans le calcul de l'estimation des effets des facteurs. Ces expériences ont été réalisées au centre du domaine d'intérêt afin de déceler une éventuelle dérive.

Afin d'évaluer l'influence des facteurs sur le procédé de friture profonde, plusieurs réponses expérimentales ont été retenues :

- a) la teneur en huile

- b) la teneur en eau
- c) la couleur
- d) la texture

Chacune des réponses ci-dessus peut être représentée par une équation polynomiale quadratique valable uniquement sur l'ensemble du domaine expérimental :

$$\eta_j = \beta_{j0} + \sum_{i=1}^3 \beta_{ji} X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{jii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{jii} X_i X_j \quad \text{Équation 4-2}$$

où η_j représente les variables dépendantes, X_i les variables indépendantes, β_{j0} le terme constant, β_{ji} les coefficients linéaires du premier ordre, β_{jii} les termes carrés, β_{jij} les termes d'interaction. Il est important de prendre en compte les 10 coefficients de l'équation polynomiale pour obtenir la meilleure estimation prédictive du phénomène.

A partir du modèle polynomial, il est possible de prédire la valeur de la réponse pour différentes valeurs expérimentales. Le tracé des isoréponses, prenant en compte deux paramètres, permet de visualiser à l'intérieur du domaine expérimental, toutes les conditions opératoires qui aboutissent à une même valeur de réponse.

Les représentations graphiques des surfaces de réponse sont obtenues en générant, par le logiciel NEMRODW autant de diagrammes qu'il y a de couples de facteurs différents et de valeurs imposées aux 3 autres variables.

Avec une friteuse ménagère, nous avons réalisé une friture sous pression atmosphérique en flottaison suivant les conditions opératoires présentées dans les **tableaux 4-1** et **4-2**.

Tableau 4-1: Domaine expérimental et niveaux des facteurs retenus pour l'optimisation du procédé de friture profonde de plantain

Variables indépendantes	Symboles	Valeurs expérimentales	Niveaux
Température (°C)	X1	160 ; 165 ; 170 ; 175 ; 180	5
Temps (min)	X2	1 ; 1,5 ; 2 ; 2,5 ; 3 ; 3,5 ; 4	7
Quantité (g)	X3	160 ; 180 ; 200	3

Le bain d'huile (2 Litres) contenu dans la friteuse, est préalablement chauffé 30 minutes à la température de consigne, fixée avant de démarrer l'expérience. Pour chaque condition de friture, le niveau d'huile initial est préalablement fixé à 2 litres.

Seize conditions de friture ont été utilisées et permettent d'obtenir des tranches de plantains frits (tajadas) de teneurs en eau et huile, de couleur et de textures différentes. Ces conditions : températures/temps/quantités de plantain sont présentées dans **le tableau 4 -2**.

Tableau 4-2 : Plan d'expérimentations généré selon la matrice de Doelhart

N° Expérience	Température (°C)	Temps (min)	Quantité (g)
1	180	2,5	180
2	160	2,5	180
3	175	4	180
4	165	1	180
5	175	1	180
6	165	4	180
7	175	3	200
8	165	2	160
9	175	2	160
10	170	3,5	160
11	165	3	200
12	170	1,5	200
13	170	2,5	180
14	170	2,5	180
15	170	2,5	180
16	170	2,5	180

4.1.5 Vieillessement de l'huile au cours du temps dans les conditions optimales de friture

Une fois les conditions optimales de friture profonde déterminées en tenant compte des propriétés physicochimiques et sensorielles, un suivi du vieillissement des huiles au cours de 8 et 10 jours consécutifs a été réalisé sur les huiles Frial, de soja et de palme raffinée respectivement. 3 kilos (17 cycles) de plantain découpé en disque ont été utilisés par jour pour étudier le vieillissement des huiles au cours du procédé de friture profonde.

4.2 ANALYSES PHYSICOCIMIQUES DE LA BANANE PLANTAIN ET DES HUILES VEGETALES

4.2.1 Analyses sur la banane plantain

4.2.1.1 Mesure de la teneur en huile

La teneur en huile a été déterminée sur une quantité de 25 g de banane plantain frite et crue en utilisant de l'éther de pétrole selon la méthode de Soxhlet (AOAC, 1990) pendant 6 h. La mesure est réalisée par gravimétrie après évaporation du solvant à 50°C au rotavapor (Heidolph, laborota 4000, Tuttlingen, Germany).

4.2.1.2 Mesure de la teneur en eau

La teneur en eau est déterminée suivant la méthode AOAC (1995) sur un échantillon de 5 g étalé dans une capsule en porcelaine puis séché dans une étuve (WTB binder, amilabo, n° 970827, Germany) à 103±2°C pendant 24 heures, jusqu'à obtention d'un poids constant.

4.2.1.3 Mesure de la teneur en cendre

Elle est déterminée suivant la norme AOAC, 1997. Cinq grammes de produits ont été introduits dans un four à moufle pendant 12 heures à 600°C. Le taux de cendre est calculé comme étant le rapport de la masse finale sur la masse initiale après incinération. Le résultat est exprimé en pourcentage. L'expérience est tripliquée.

4.2.1.4 Mesure de la teneur en protéines

La teneur en azote total du broyat frais est déterminée par la méthode de Kjeldahl (AOAC, 1990). Cette méthode est basée sur la transformation de l'azote organique en azote minéral sous forme ammoniacale $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ par l'action oxydative de l'acide sulfurique sur la matière organique en présence d'un catalyseur (Na_2SO_4 17 g / 100 g ; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 1,5 g / 100 g). L'ion ammonium du digestat est déplacé par une base forte (NaOH) que l'on ajoute en excès. Au cours de la distillation, l'hydroxyde d'ammonium formé (NH_4OH) est entraîné par la vapeur d'eau et récupéré dans un vase de titrage contenant une solution d'acide borique en excès. Le borate d'ammonium formé peut alors être déplacé par de l'acide

sulfurique titré. Le dosage est réalisé de façon automatique avec un appareil automatique de type Vapodest 4S Gerhardt. Pour chaque échantillon, l'analyse est répétée trois fois.

Les résultats sont exprimés en concentration massique d'azote. La formule utilisée pour les échantillons solides est la suivante :

$$\text{Taux d'azote (\%)} = (V - V_0) \times MN_2 \times N(H_2SO_4) \times (100/1000 \times m_e) \quad \text{Équation 4-3}$$

Avec V : volume d'H₂SO₄ nécessaire au titrage de l'échantillon en ml,

V₀ : volume d'H₂SO₄ nécessaire au titrage du témoin en ml,

N : normalité de la solution d'H₂SO₄,

m_e : prise d'échantillon en g

M : masse molaire azote

$$\text{Taux de protéines (g/100g)} = 6,25 \times \text{taux d'azote} \quad \text{Équation 4-4}$$

6,25 : facteur protéique (Adler-Nissen, 1986)

4.2.1.5 Mesure de la teneur en amidon (AOAC, 1996.11, 2011)

100 mg d'échantillon de banane plantain broyé au préalable sont placés dans un tube en verre (16 x 120 mm), auxquels sont ajoutés 0,2 ml d'éthanol aqueux à 80% (v/v). Le tube est ensuite vortexé pour disperser le mélange. On ajoute immédiatement 2 ml de diméthylsulfoxyde (DMSO) dans le tube qui est de nouveau agité vigoureusement avant d'être placé dans un bain d'eau bouillante pendant 5 minutes. On ajoute à nouveau immédiatement 3 ml d'α-amylase thermostable (contenu de la bouteille, n°1 dilué dans le réactif N°1 à 1:30; solution tampon d'acétate de sodium de 100 mM, pH 5,0). Le tube est incubé dans un bain d'eau bouillante pendant 6 min sous agitation après 2, 4 et 6 min. Après avoir ajouté dans le tube 0,1 ml du contenu de la bouteille 2 (amyloglucosidase, 330 U d'amidon), celui-ci est bien agité sur un vortex puis incubé à 50°C pendant 30 minutes. Après une heure de réaction, le contenu entier du tube est transféré dans une fiole jaugée de 100 ml, puis centrifugé à 3000 rpm pendant 10 min. Le surnageant est prélevé pour le

dosage. On introduire 0,1 ml du surnageant dans des tubes à essai en verre (16 x 100 mm), auxquels on ajoute 3,0 ml du réactif GOPOD (glucose oxydase peroxydase) (solution 4) à chaque tube (y compris le témoin D-glucose et réactifs blancs), et on incube les tubes à 50°C pendant 20 min. Les témoins D-glucose sont constitués de 0,1 ml de la solution standard D-glucose (1 mg/ml) et 3,0 ml de réactif GOPOD. La solution du réactif blanc se compose de 0,1 ml d'eau et 3,0 ml de GOPOD. L'absorbance est mesurée à 510 nm contre le blanc pour chaque échantillon.

$$Amidon (\%) = \Delta A \times F \times \frac{FV}{0,1} \times \frac{1}{1000} \times \frac{100}{W} \times \frac{162}{180} \quad \text{Équation 4-5}$$

Où ΔA = absorbance (réaction) lue contre le blanc réactif ; $F = 100$ (mg de D-glucose) / absorbance de 100 μg de glucose (conversion de la mesure d'absorbance en μg) ; FV = volume final 100 ml ou 10 ml ; 0,1 = volume de l'échantillon analysé ; $1/1000$ = conversion de μg à mg ; $100/W$ = Facteur exprimant "l'amidon" en pourcentage du poids de l'échantillon ; W = le poids en milligrammes de l'échantillon à analyser ; $162/180$ = ajustement de D-glucose libre en anhydro D-glucose (comme c'est le cas dans l'amidon).

4.2.1.6 Degré de gélatinisation de l'amidon

Les caractéristiques thermiques de la banane plantain mûre fraîche, ont été déterminées suivant le protocole de Teng *et al.*, (2013) en utilisant un appareil d'analyse thermique différentielle (Model Pyris, Perkin-Elmer Corp., Norwalk, USA). Les échantillons de banane plantain fraîche (30-40mg) ont été directement introduits dans des capsules en aluminium, fermées et scellées hermétiquement. Une capsule vide scellée hermétiquement a été utilisée comme référence. Les capsules ont été portées à une température allant 30°C à 100°C et à une vitesse de 10°C/min. Les températures de transition (onset) (T_0), apparition (pic) (T_p) et la température finale (endset) (T_c) ont été calculées automatiquement, tandis que la plage de température de gélatinisation (ΔT) a été calculée par différence : $T_c - T_0$. L'enthalpie de gélatinisation a été calculée automatiquement sur base sèche de poudre de banane plantain.

4.2.1.7 Analyse texturale

Les propriétés texturales des échantillons frits ont été évaluées avec un analyseur de texture, traction/compression Lloyd LRX (Lloyd Instruments Ltd, Hampshire, Angleterre) avec

une cellule de 500N connectée à un ordinateur. Les échantillons ont été testés immédiatement après retrait du bain d'huile. Le disque de banane plantain à frire a été placé sur la plate-forme de l'analyseur de texture et comprimé jusqu'à 60% de sa hauteur initiale, en utilisant une sonde de diamètre 6 mm (compression à une vitesse constante de 20 mm/min). La force maximale requise pour comprimer l'échantillon a été enregistrée avec un capteur de 500 Newton. Chaque mesure a été effectuée sur 10 échantillons de plantain frits. Tous les paramètres de texture ont été mesurés et calculés par le logiciel nexygen du Lloyd selon la procédure utilisée par Teng et ses collaborateurs en 2013. Les courbes d'analyses de texture (TPA) ont été analysées en termes de dureté, cohésion, masticabilité, adhésion et rigidité.

4.2.1.8 Détermination de la couleur

Les mesures instrumentales de la couleur de la banane plantain fraîche et frite ont été réalisées avec un appareil microflash 200d (datacolor International, France) et les résultats ont été exprimés en conformité avec le système CIELAB (Colorimetry, 1986). Dix mesures ont été effectuées sur chaque échantillon. Le paramètre ΔE , qui indique la différence de couleur entre la référence et l'échantillon a été déterminé en utilisant l'équation de Bansal *et al.*, (2010) :

$$\Delta E = \left[(L^t - L_0)^2 + (a^t - a_0)^2 + (b^t - b_0)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Équation 4-6}$$

Où L^* ($L^* = 0$ (noir) et $L^* = 100$ (blanc)) ; a^* ($-a^* = \text{vert}$ et $+a^* = \text{rouge}$) ; b^* ($-b^* = \text{bleu}$ et $+b^* = \text{jaune}$). L_0 , a_0 et b_0 sont les valeurs L^* , a^* et b^* du plantain frais et L^t , a^t et b^t se réfèrent aux valeurs de couleur de la banane plantain frite à différents cycles de friture.

4.2.1.9 Mesure du pH

Pour déterminer le pH de la banane plantain, 30 g de pulpe sont mixés en présence de 90 ml d'eau distillée dans un mixeur domestique pendant 2 minutes. L'ensemble de la préparation est filtrée pour en séparer le jus de la pulpe. Le pH est alors mesuré dans le jus extrait en plongeant simplement la sonde du pH-mètre après étalonnage.

4.2.1.10 Evaluation sensorielle des disques de plantain

Trente consommateurs non entraînés ont été recrutés parmi des étudiants et le personnel de l'université de Lorraine - ENSAIA pour une analyse sensorielle de la banane plantain. Plus de 50% des consommateurs n'étaient pas habitués à consommer de la banane plantain frite. Les consommateurs ont évalué l'acceptation du produit en terme de couleur, goût sucré, le fondant, la teneur en matière grasse et l'acceptabilité globale sur une échelle de cinq points : 5 - très agréable, 4 - agréable, 3 - ni désagréable ni agréable, 2 - désagréable, 1- très désagréable.

4.2.2 Analyses sur les huiles de friture

4.2.2.1 Indice d'acide

Le pourcentage d'acides gras libres (AGL) est déterminé suivant la méthode modifiée AOCS, 1989. Cinquante ml du mélange éther/éthanol 1:1 (v/v) ont été utilisés pour dissoudre 5 g d'échantillon d'huile et titrés avec l'hydroxyde de sodium à 0,1 N (Foglia *et al.* , 1993) en présence de phénolpthaléine éthanolique comme indicateur.

Le pourcentage d'acides gras libres (AGL) est calculé suivant la formule :

$$\text{Taux d'AGL (\% acide oléique)} = \frac{V \times c \times M}{10 \times m} \quad \text{Équation 4-7}$$

Où

V est le volume (ml) de NaOH 0,1 N

c est la concentration de NaOH 0,1 N

M est la masse molaire de l'acide oléique (M = 282)

m est la masse de la prise d'essai

L'indice d'acide se calcule comme suit :

$$\text{Indice d'acide (\% acide oléique)} = \% \text{ d'acide gras libres} \times 1,99 \quad \text{Équation 4-8}$$

4.2.2.2 Indice de peroxydes

Il donne une évaluation de la teneur en peroxydes présents dans un corps gras, il est déterminé selon la méthode AOAC, 1997.

A 5 g ($\pm 0,05$ g) de l'échantillon pesé dans un erlenmeyer sont ajoutés 30 ml d'un mélange acide acétique - chloroforme (3 - 2, v/v) permettant de dissoudre la matière grasse. 0,5 ml d'une solution saturée de KI (5 g / 5 ml d'eau) est additionné sous agitation pendant 1 min avant de laisser reposer la solution à l'abri de la lumière. Après addition d'eau distillée (30 ml) et quelques gouttes d'empois d'amidon (indicateur de fin de réaction) l'iode libéré est titré sous agitation avec une solution de thiosulfate 0,02 N.

Un essai à blanc est effectué sans matière grasse. Le résultat est exprimé comme suit :

$$IP = \frac{(V - V_0) \times N \times 1000}{\text{Masse en gramme de la prise d'essai}} \quad \text{Équation 4-9}$$

Où

V: volume en ml de la solution de thiosulfate

V₀: volume en ml de la solution de thiosulfate pour le témoin

N: normalité exacte de la solution de thiosulfate

Un résultat nul sera exprimé par IP < 0,25 méq. / Kg d'O₂ actif

4.2.2.3 Indice de para-anisidine

La mesure de l'indice de p-Anisidine d'une l'huile oxydée au cours de la friture du plantain a été déterminée selon la méthode recommandée AOCS (AOCS, 1998). On pèse précisément 100 mg d'huile que l'on dissout à un volume de 25 ml d'iso-octane dans un tube à essai à vis de 25 ml de volume. L'absorbance (A₁) de cet échantillon est mesurée à 350 nm en utilisant un spectrophotomètre UV-visible (UV-visible 1605 SHIMADZU). Exactement 5 ml de la solution mère (A₁) ont été transférés dans un tube à essai et 5 ml de solvant ont été ajoutés à un autre tube à essai. Un millilitre du réactif de p-anisidine (2,5 g / l solution dans l'acide acétique glacial) a été ajouté à chaque tube et agiter. Après exactement 10 min, l'absorbance (A_s) de la solution dans le premier tube à essai a été mesurée à 350 nm, en

utilisant la solution du deuxième tube comme essai blanc. La valeur de p-Anisidine a été calculée suivant la formule suivante :

$$\text{Indice de } P\text{-anisidine} = 25 \times [(1,2 \times A_2 - A_1) / W] \quad \text{(Équation 4-10)}$$

Où A_1 = l'absorbance avant d'ajouter p-Anisidine, A_2 = l'absorbance à 350 nm après ajout de p-anisidine et W = poids de l'échantillon (g).

4.2.2.4 Détermination de la valeur Totox

L'oxydation totale ou Valeur Totox mesure la dégradation globale d'une l'huile et est égale à la somme de l'indice de para-anisidine (IPa) et deux fois l'indice de peroxydes (IP) (Baur, 1995 ; Tan et Man, 1999 ; Shahidi et Wanasundara, 2002).

$$\text{Valeur Totox} = \text{IPa} + 2 \text{ IP} \quad \text{Équation 4-11:}$$

4.2.2.5 Indice d'iode

L'indice d'iode représente le nombre de grammes d'iode fixé par 100 g de corps gras. Il permet de connaître le degré d'insaturation global des matières grasses. Il a été déterminé suivant la norme (NF EN ISO, 1999).

Le dosage consiste à faire agir une solution de monochlorure d'iode (ICl), le réactif de Wijs (25 ml) sur l'échantillon (0,2 - 0,3 g) préalablement dissous dans 20 ml de cyclohexane - acide acétique (1 / 1 ; v/v). 20 ml de solution d'iodure de potassium à 10 % et 150 ml d'eau sont additionnés afin d'extraire l'iode en excès dans la phase aqueuse avant un dosage en retour par le thiosulfate de sodium $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,1 N. Quelques gouttes d'empois d'amidon (1 - 2 ml) sont ajoutées pendant la titration jusqu'à décoloration totale.

$$I I = \frac{(B - S) \times 0,1 \times 12,69}{\text{Masse de matière grasse}} \quad \text{Équation 4-12}$$

Où

B; est le volume de thiosulfate de sodium (ml) nécessaire pour titrer le blanc

S; est le volume de thiosulfate de sodium (ml) nécessaire pour titrer l'essai

0,1 est la molarité de la solution de thiosulfate de sodium

4.2.2.6 Analyse thermique différentielle

Le profil thermique des huiles est déterminé suivant la méthode de Tan et Man (1999) avec quelques modifications apportées, où 6 à 12 mg d'échantillon ont été pesés dans des capsules en aluminium hermétiquement scellées. Une capsule en aluminium vide et hermétiquement scellée a été utilisée comme référence. Le programme thermique est le suivant : dans la chambre à 20°C, le bloc de cellules de la DSC a été chauffé rapidement jusqu'à 80°C à une vitesse de 40°C/min et maintenu pendant 5 minutes à cette même température pour éliminer l'histoire thermique des huiles. Un refroidissement rapide de 80 à -30°C à la vitesse de 5°C/min est appliqué puis maintenu pendant 5 minutes à cette température pour permettre les changements polymorphes. Enfin, un refroidissement de -30 à -85°C à une vitesse de 1°C/min est appliqué pour définir le profil de refroidissement.

La stabilité de l'huile à l'oxydation a été déterminée sur le même appareil. L'échantillon était préparé comme mentionné plus haut et les températures isothermes étaient fixés à 110, 130 et 140°C. L'oxygène pur est utilisé comme gaz à un volume de 50ml/min dans l'enceinte du bloc de chauffage. Les résultats sur le temps d'induction à l'oxydation ou « oxidation induction time » (OIT) en anglais sont obtenus automatiquement par extrapolation sur le chromatogramme de la partie descendante et l'axe du temps.

4.2.2.7 Composition en acides gras

L'analyse des acides gras est effectuée par chromatographie en phase gazeuse (Belhaj et al., 2010).

Préparation des esters méthyliques (Ackman, 1998)

Les esters méthyliques d'acides gras ont été préparés par le réactif au trifluorure de bore à la concentration de 8% dans du méthanol (BF_3 / MetOH) avec 100 mg d'échantillon d'huile. 100 mg d'échantillon sont pesés dans un tube à essai à vis de 10 ml. On y ajoute 1,5 ml d'hexane et 1,5 ml BF_3 / MetOH. Le tube est fermé hermétiquement sous azote, agité énergiquement, puis chauffé à 100°C pendant 1h. Après refroidissement à température ambiante, on ajoute 1 ml d'hexane, 2 ml d'eau distillée, puis on agite sous azote. Deux phases se séparent après repos. La phase supérieure est récupérée dans un autre tube mis sous azote. On extrait deux fois la phase inférieure avec 1 ml d'hexane. L'ensemble des phases (esters méthyliques) collectées est lavé avec 2 ml d'eau distillée, puis séché sur sulfate de sodium anhydre. Le solvant est évaporé sous azote. De l'hexane est ajouté pour

fixer la concentration des esters méthyliques, adaptée à l'analyse par chromatographie en phase gazeuse.

L'analyse des esters méthyliques est réalisée sur un chromatographe Shimadzu (GS 2010) équipée d'une colonne capillaire (0,25 mm ID × 60m dont l'épaisseur du film est de 0,20 µm) et d'un détecteur d'ionisation de la flamme. La température initiale du four est fixée à 120°C pendant 2 minutes puis augmente à 180 °C pendant 40 minutes à raison de 2°C/min. Un nouveau palier à la température de 220° C pendant 3 min est programmé à raison de 25°C/min. La température du détecteur est à 250°C. L'hydrogène a été utilisé comme gaz vecteur avec un débit de 40ml/min. Un µl d'échantillon a été introduit dans la colonne pour analyse. Les pics d'identification d'esters méthyliques d'acide gras (FAMES) ont été identifiés à l'aide de standards (PUFA2 from vegetable source ; Supelco, Sigma–Aldrich, Bellefonte, PA, USA).

4.2.2.8 Détermination des composés polaires totaux

Le pourcentage de composés polaires est une mesure permettant d'évaluer le degré d'oxydation d'une huile de friture.

4.2.2.8.1 Capteur électronique Ebro

Le capteur électronique Ebro, testeur d'huile FOM 310 est un capteur qui permet d'évaluer la qualité de différentes huiles. La mesure des composés polaires (%) s'effectue en plongeant la sonde directement dans l'huile chaude du bain de friture. En même temps, on mesure la température de l'huile en degré Celsius (°C) et sa qualité en pourcentage de composés polaires.

4.2.2.8.2 PCT 120 3M

Le PCT 120 3M est un testeur largement employé pour le contrôle des huiles de friture qui donne une estimation du degré de dégradation d'une huile en mesurant les composés polaires. La mesure des CPT s'obtient en versant une certaine quantité d'huile dans l'appareil après y avoir placé la languette 3M. Au bout de 35 min les composés polaires migrent sur la languette 3M. Une fiche destinée à la lecture du taux de composés polaires par la méthode au PCT 120, nous permet de visualiser approximativement le pourcentage

en CPT contenu dans l'huile. La limite du taux en CPT à ne pas dépasser est indiquée sur cette fiche en fonction des recommandations.

4.2.2.8.3 Chromatographie sur colonne de silice

La séparation est réalisée par chromatographie sur colonne de gel silice (70 à 230 mesh) selon la méthode AOCS, (1998). Les composés non polaires sont séparés par élution avec un système de solvant éther de pétrole (point d'ébullition 40 - 60 °C) - éther diéthylique (87/13, v/v). Environ 2,5 g d'huile sont dissous dans 50 ml de solvant d'élution. 20 ml sont déposés sur le gel de silice introduit dans la colonne. Les composés neutres sont élués avec 150 ml du solvant d'élution en 60 - 70 min puis pesés. La quantité de composés polaires est déterminée gravimétriquement selon la formule suivante :

$$\% \text{ TPM} = [(m - m_1) / m] \times 100 \quad \text{Équation 4-13}$$

Où

m est la masse d'huile contenue dans les 20 ml de solution introduite dans la colonne, m₁ est la masse de composés non polaires.

4.2.2.9 Détermination de la couleur de l'huile

La couleur de l'huile a été mesurée suivant la procédure AOCS, 1989 avec un appareil Lovibond, Modèle PFX 195, en utilisant un échantillon d'huile de 5 ml. Les échantillons d'huile ont été analysés à 45°C selon le protocole de Bhattacharya *et al.*, (2008). Les paramètres déterminés sont : L* (L* = 0 [noir] et L* = 100 [blanc]), a* (-a* = vert et + a* = rouge), b* (-b* = bleu et + b* = jaune).

Le paramètre ΔE, qui indique la différence de couleur entre la référence et l'échantillon a été déterminé par calcul en prenant l'équation selon la procédure de Bansal *et al.*, (2010) comme indiqué dans le chapitre 4.2.1.8.

4.2.2.10 Détermination de la viscosité des huiles de friture

La viscosité dynamique des échantillons d'huile a été déterminée à la température 25°C (Besbes *et al.*, 2005) avec un rhéomètre Malvern Kinexus Pro. L'échantillon est placé sur une plaque CP2/50 SC0029SS. Pour cela les conditions opératoires ont été les suivantes : taux de cisaillement initial à 0,01 s⁻¹ et le taux de cisaillement final à 100 s⁻¹, avec une durée de rampe de 10 min.

La rhéologie de l'huile au cours du chauffage a été réalisée en utilisant un viscosimètre (Malvern Kinexus Pro) suivant la méthode de (Bansal *et al.*, 2010) avec une légère modification. L'échantillon est placé sur une plaque CP2/50 SC0029SS et des mesures de viscosité ont été effectuées sur la plage de température allant de 40 à 180°C, avec un intervalle de 1°C et à une vitesse de cisaillement constante (shear rate) de 105,7 s⁻¹ (80 rpm).

4.2.2.11 Détermination des diènes et triènes conjugués

Les déterminations des diènes et triènes conjugués à des longueurs d'onde de 232 nm et 270 nm respectivement ont été réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible (1605 SHIMADZU). Environ 2mg d'huile ont été pesés avec précision dans un tube volumétrique de 10 mL et 4 ml d'hexane de qualité HPLC sont ajoutés. Les échantillons sont ensuite passés sous courant d'azote avant d'être soumis à un vortex pendant 20 s à la vitesse maximale. L'absorbance de la solution est mesurée à 232 nm pour les diènes et 270 nm pour les triènes.

4.2.3 Microscope électronique à balayage

Deux types d'observations microscopiques ont été réalisés pour visualiser l'huile répartie et le degré de gélatinisation de l'amidon natif sur le plantain. Le protocole de préparation et d'observation au microscope optique (MO) et au microscope électronique à balayage (MET), sont présentés ci-dessous :

Au bout de 2 heures un échantillon d'un mm³ est fixé dans du glutaraldéhyde 2,5 % dans du tampon cacodylate de sodium pH 7,2 à 4°C. Cet échantillon est rincé au tampon cacodylate pendant plusieurs heures puis fixé au tétroxyde d'osmium 1% dans le tampon cacodylate, à température ambiante. Une fois fixé, l'échantillon subi une série de déshydrations par les

alcools (à différent concentration) et l'oxyde de propylène pendant un temps précis. Il est ensuite pré-imprégné durant 1 heure dans le mélange résine embbed 812 et oxyde de propylène à volume égal pour être ensuite totalement imprégné toute la nuit dans la résine pure. L'échantillon subit une inclusion dans le moule en latex, capsules beem, gélules ... avec résine neuve pour ensuite être déposé dans une étuve à 56°C pendant 48 h minimum afin de polymériser. L'échantillon étant prêt, des coupes semi-fines de 1,5 μm (contrastées au bleu Azur II et observées au MO) et des coupes ultra-fines de 70 nm (contrastées à l'acétate d'uranyle et au nitrate de plomb et observées au MET–CM12 Phillips) sont réalisées sur un ultra-microtome Reichert-Yung.

4.3 CINETIQUES DE PERTE EN EAU ET GAIN D'HUILE

Pour réaliser les cinétiques de perte en eau et gain d'huile, des séries de fritures profondes ont été réalisées toutes les 15 secondes dans les conditions optimales. La température a été fixée à 150, 170 et 190°C pour un temps de friture total de 3 minutes. Toutes les 15 secondes, des échantillons de plantain ont été prélevés. L'épaisseur du plantain a été également fixée à 5, 10 et 15 mm. A chaque cycle de friture, les mêmes conditions de préparation et friture ont été employées comme mentionné préalablement. A la fin de chaque cycle de friture, les échantillons prélevés sont égouttés, pesés, lyophilisés et pesés à nouveau avant d'être analysés en termes de perte en eau (base humide) et gain d'huile (base sèche).

4.4 OUTILS MATHEMATIQUES ET STATISTIQUES

La méthodologie des surfaces de réponses a été effectué à l'aide du logiciel NEMRODW et la modélisations des cinétiques de perte d'eau et d'absorption d'huile a été simulée à l'aide du logiciel MATLAB. L'analyse de variance (ANOVA) et le test de comparaison selon le principe de la plus petite différence significative (LSD) de Fisher ont été appliqués à un niveau de signification de 0,05 grâce au logiciel Statgraphique Centurion XV. Les logiciels Sigma plot 11.0 et originPro 6.1 ont été utilisés pour la génération des graphiques.

RESULTATS ET DISCUSSION

5 RESULTATS ET DISCUSSION

5.1 LES HUILES VEGETALES UTILISEES DANS LE PROCEDE DE FRITURE PROFONDE

5.1.1 Composition en acides gras des huiles de friture

Les compositions en acides gras des huiles n'ayant subi aucun traitement thermique et utilisées pour la friture de la banane plantain sont présentées dans le **tableau 5-1**.

Les acides gras prédominants dans ces huiles sont l'acide gras palmitique ($4,26 \pm 0,01\%$; $10,46 \pm 0,07\%$; $41,28 \pm 0,09$), l'acide stéarique ($1,25 \pm 0,00\%$; $2,92 \pm 0,06\%$; $3,598 \pm 0,021\%$), l'acide oléique ($72,97 \pm 0,53\%$; $25,42 \pm 0,09\%$; $42,445 \pm 0,137\%$), l'acide linoléique ($16,53 \pm 0,10\%$; $53,59 \pm 0,10$; $10,804 \pm 0,134\%$) et l'acide α -linolénique ($4,83 \pm 0,44\%$; $6,00 \pm 0,04\%$; $0,166 \pm 0,004\%$) respectivement pour les huiles Frial, soja et palme raffinée oléine. L'huile Frial est celle qui contient une quantité plus élevée en acide gras oléique par rapport aux deux autres. Elle présente un pourcentage total en AGMI de $73,04 \pm 0,43\%$ par rapport aux huiles de soja et palme raffinée oléine qui présentent un pourcentage total de $26,07 \pm 0,10\%$ et $42,71 \pm 0,12\%$ respectivement. Dans la littérature, on trouve plusieurs travaux qui stipulent que la présence d'AGMI en grande quantité dans les huiles alimentaires est plutôt souhaitable en vue de garantir une bonne santé (Mensink et Katan, 1990). Abdulkarim et ses collaborateurs (2007) mentionnent que les huiles qui renferment une fraction élevée en AGMI, particulièrement en acide oléique, contribuent à une diminution du risque de maladie coronarienne (présence important dans l'huile Frial). Ce type d'huile pourrait également être choisi pour la friture en raison de la bonne stabilité de ces acides gras au procédé de friture (Zribi *et al.*, 2014). Dans l'huile de soja, l'acide gras prédominant est l'acide linoléique ($53,59 \pm 0,10\%$). On observe également un pourcentage élevé en acide linolénique ($6,03 \pm 0,04$) qui en principe le disqualifie de la liste des huiles de friture. De nombreuses études menées ont affirmé qu'une teneur inférieure à 2% d'acide linolénique augmente la stabilité de l'huile à l'oxydation. L'huile de palme par contre est très riche en AGS particulièrement en acide palmitique, d'où elle tire sa dénomination.

Tableau 5-1 : Composition initiale en acides gras des différentes huiles utilisées

Acide gras	formule	palme raffinée O. % AG	Frial % AG	soja % AG
Saturés				
ac. Caprylique	C8:0	0,02±0,00		
ac. Caprique	C10:0	0,02±0,00		
ac. Laurique	C12:0	0,24±0,02		
ac. Myristique	C14:0	0,87±0,04		0,08±0,00
ac. Palmitique	C16:0	41,28±0,09	4,26±0,01	10,46±0,07
ac. stéarique	C18:0	3,60±0,02	1,25±0,00	2,92±0,06
ac. Arachidique	C20:0	0,26±0,00	0,09±0,00	0,41±0,05
ac. béhémique	C22:0	0,03±0,01	0,20±0,00	0,05±0,00
ac. Tricosanoïque	C23:0			0,42±0,01
Monoinsaturés				
ac. Palmitoléique	C16:1	0,13±0,03		0,12±0,00
ac. Élaïdique	C18:1n9t	0,00±0,00		
ac. Oléique	C18:1n9c	42,45±0,14	72,97±0,53	25,42±0,09
ac. Gadoléique	C20:1n11c	0,13±0,00	0,14±0,00	0,53±0,07
Polyinsaturés				
ac. Linoléique	C18:2n6c	10,80±0,13	16,53±0,10	53,59±0,10
ac. α-Linolénique	C18:3n3	0,17±0,00	4,83±0,44	6,00±0,04
Σ AGI		53,68±0,07	94,40±0,97	85,67±0,03
Σ AGPI/Σ AGMI		0,26±0,00	0,07±0,01	2,29±0,01
Σ AGI/Σ AGS		1,16±0,00	16,70±0,76	5,98±0,02
Σ AGMI/Σ AGS		0,92±0,00	12,92±0,53	1,82±0,01
Σ AGPI/Σ AGS		0,24±0,00	3,78±0,23	4,16±0,01
Σ AGMI/Σ AGPI		3,89±0,06	3,42±0,07	0,44±0,00
Σ n-6/Σ n-3		65,27±1,31	3,44±0,29	8,93±0,06
Σ AG		100,000	100,00	100,00
Σ AGS		46,32±0,07	5,66±0,20	14,33±0,03
Σ AGMI		42,71±0,12	73,04±0,43	26,07±0,10
Σ AGPI		10,97±0,14	21,36±0,54	59,60±0,10

Moyennes de trois répétitions ± écart type.

Le rapport $\Sigma \text{AGPI}/\Sigma \text{AGS}$ (Romano *et al.*, 2012) tout comme le rapport C18:2/C16:0 (non représenté dans le **tableau 5-1**) (Tan et Man, 1999) sont considérés comme étant des indicateurs de la dégradation des huiles. Le rapport $\Sigma \text{AGPI}/\Sigma \text{AGS}$ est plus élevé dans l'huile

de soja ($5,98 \pm 0,02\%$) suivi de l'huile Frial ($3,78 \pm 0,23\%$) et enfin de l'HPRO ($1,16 \pm 0,01\%$). Les deux rapports cités plus haut, sont étroitement liés du fait que le C18:2 (AGPI) est plus susceptible à l'oxydation et le C16:0 (AGS) est plus stable à l'oxydation (Bansal *et al.*, 2010). Lors de l'altération des huiles, les réactions d'élongation et de désaturation entraînent une diminution d'AGPI et conduit probablement une augmentation du taux d'AGS et en même temps à la diminution du rapport entre deux (Liu et White, 1992 ; Tan et Man, 1999).

Le rapport n6/n3 conduit à des valeurs proches de $3,44 \pm 0,29\%$ (frial), $8,93 \pm 0,06\%$ (soja) et $65,27 \pm 1,31\%$ (HPRO). Ces deux dernières huiles présentent des valeurs un peu trop élevées, surtout pour l'HPRO. Des études ont été menées sur des animaux prouvant que la conversion de l'acide linoléique en acide arachidonique (C20:4n6) et l'acide linoléique en EPA dépend du rapport entre le C18:2/C18:3 dans les lipides des aliments consommés. Claude, en 2013, montre que lorsque ce rapport est supérieur à 5, les tissus animaux s'enrichissent en acide arachidonique. Et lorsque ce rapport est inférieur à 5, l'EPA et parfois le DHA prennent un rôle majoritaire dans les tissus.

5.1.2 Propriétés physicochimiques des huiles végétales

Les caractéristiques physicochimiques initiales des trois différentes huiles sont présentées dans le **tableau 5-2**.

Les indices chimiques des trois huiles ne montrent aucune différence de valeur en indice d'acide qui est de 0,22 ; $0,18 \pm 0,02$ et $0,24 \pm 0,08\%$ d'acide oléique pour les huiles Frial, de soja et de palme raffinée oléine respectivement. De même les valeurs en IPa sont proches et ne montrent aucune différence significative entre elles. Elles présentent des valeurs proches de $0,95 \pm 0,08$, $1,37 \pm 0,54$ et $1,27 \pm 0,59$ respectivement. L'huile Frial présente des indices d'iode et de saponification plus élevés ($226,00 \pm 0,97$ et $236,30 \pm 0,35$ respectivement), suivi de l'huile de soja ($132,41 \pm 1,86$ et $181,41 \pm 0,11$ respectivement) et enfin de l'HPRO ($55,103 \pm 0,2$ et $151,40 \pm 0,64$ respectivement). On observe également que l'IP et la valeur tottox varie en fonction de l'huile. L'huile Frial présente un IP et une valeur tottox avant traitement thermique plus faibles ($1,18 \pm 0,00$ meqO₂/Kg et $3,31 \pm 0,09$ respectivement) comparés à ceux de l'huile de soja ($2,02 \pm 0,15$ meqO₂/Kg et $5,42 \pm 0,35$ respectivement) et enfin de l'HPRO ($3,17 \pm 0,02$ meqO₂/Kg et $7,62 \pm 0,57$ respectivement).

Tableau 5-2 : Propriétés physicochimiques initiales des huiles de friture utilisées

Propriétés physicochimiques	Huile Frial	Huile de soja	Huile de palme oléique raffinée
Indices chimiques			
IA (% acide oléique)	0,22±0,01 ^a	0,18±0,02 ^a	0,24±0,08 ^a
IP (meqO ₂ /Kg)	1,18±0,00 ^a	2,02±0,15 ^b	3,17±0,02 ^c
I.I (g de I ₂ /100g)	226,00±0,97 ^c	132,41±1,86 ^b	55,103±0,2 ^a
I.S	236,30±0,35 ^c	181,41±0,11 ^b	151,40±0,64 ^a
I.Pa	0,95±0,08 ^a	1,37±0,54 ^a	1,27±0,59 ^a
Totox	3,31±0,09 ^a	5,42±0,35 ^b	7,62±0,57 ^c
Couleur			
L*	95,27±0,08 ^b	94,87±0,10 ^b	86,33±0,33 ^a
a*	-1,58±0,03 ^c	-2,57±0,05 ^b	-3,68±0,04 ^a
b*	6,47±0,07 ^a	10,52±0,05 ^b	30,70±0,21 ^c
Profil thermique			
ΔH (J/g)	41,91±0,61 ^c	33,86±1,65 ^b	1,84±0,198 ^a
ΔT (°C)	-50,15±0,21 ^c	-52,43±0,12 ^b	-55,66±0,51 ^a
Composés polaires totaux			
Ebro	2,9±0,96 ^a	7,50±0,50 ^b	11,37±0,23 ^c
Silice	4,49±0,01 ^a	5,15±1,97 ^a	10,42±1,40 ^b
Viscosité	51,8±0,01 ^a	55,69±1,90 ^b	72,81±2,49 ^c
Diènes conjugués	0,22±0,10 ^c	0,19±0,01 ^b	0,03±0,01 ^a
Triènes conjugués	0,041±0,01 ^b	0,01±00 ^a	0,02±0,01 ^a

Moyennes de trois répétitions, Les moyennes suivies de la même lettre dans une colonne ne sont pas significativement différentes (p <0,05) suivant le test d'ANOVA de Fisher.

La couleur initiale de nos huiles est donnée par les coordonnées L*, a* et b*. La valeur L* indique la luminance. Une valeur proche de 100, indique que l'huile est claire. L'huile Frial présente un L* plus élevé (95,27±0,08), suivi de l'huile de soja (94,87±0,10) et enfin l'HPRO (86,33±0,33). Les trois huiles présentent des valeurs négatives concernant la coordonnée a* (coloration verte) avec des valeurs situées à -1,58±0,03 (Frial), -2,57±0,05 (soja), -3,68±0,04 (HPRO). Le paramètre b* indiquant une couleur jaune lorsqu'il est positif est plus élevé chez l'HPRO (30,70±0,21), suivi de l'huile de soja (10,52±0,05) et enfin l'huile Frial (6,47±0,07).

Le profil thermique des huiles a révélé un seul pic de cristallisation pour l'HF et l'HS. Par contre pour l'HPRO, on note la présence de deux pics de cristallisation dont l'un est majeur entre 0 et 1°C (non représenté), et l'autre mineur où il a montré une température de cristallisation plus basse (-55,66±0,51°C) à l'état initial avec une faible enthalpie (1,84±0,20 J/g), comparé à l'huile de soja (-52,43±0,12°C) avec une consommation d'énergie de

33,86±1,65 J/g, suivi de l'huile Frial qui laisse apparaître un pic à -50,15±0,21°C avec une consommation d'énergie de 41,91±0,61J/g.

Les composés polaires totaux obtenus par trois méthodes montrent que l'huile Frial est celle qui présente les valeurs les plus faibles comparées aux autres huiles. L'HPRO présente particulièrement un taux de CPT beaucoup trop élevé à l'état initial pour les trois méthodes où les valeurs sont autour de 11,37±0,23 (Ebro), 10,42±1,40 (silice) et 13,75±0,56 (PCT 120). En principe, le pourcentage de CPT devrait se situer entre 0,4 – 6,4% pour une huile, avant utilisation, comme l'indique Farhoosh et Tavassoli-Kafrani (2010).

La viscosité dynamique à 25°C a montré que l'HPRO est la plus visqueuse des trois huiles, avec une valeur de 72,81±2,49 mPas, suivi de l'huile de soja avec une viscosité de 55,69±1,90 mPas et enfin l'huile Frial avec une viscosité initiale de 55,69±1,90 mPas. Cette différence est probablement due à la nature des chaînes d'acides gras dans les huiles. De nombreux auteurs ont clairement indiqué qu'il y a une relation évidente entre la longueur de la chaîne d'acide gras et la viscosité (Besbes *et al.*, 2005)

Les composés primaires d'oxydation représentés par les diènes conjugués sont élevés dans l'huile Frial (0,22±0,10) suivi de l'huile de soja (0,19±0,01) et enfin l'HPRO (0,03±0,01). Ces valeurs indiquent la présence de faibles teneurs en AGPI oxydés dans les différentes huiles.

5.2 PROPRIETES PHYSICOCHIMIQUES DE LA BANANE PLANTAIN

5.2.1 Composition de la banane plantain

Avant de commencer l'étude sur le procédé de friture, la banane plantain a été caractérisée afin de déterminer sa composition initiale. Les fruits du bananier (bananes dessert, banane à cuire ou plantain) contiennent des composés qui sont solubles dans l'eau. Il s'agit entre autre des sucres réducteurs ou non, des vitamines, des acides aminés et des pectines. Ce groupe de composés constituent ce qu'on appelle l'extrait sec soluble.

La banane plantain utilisée dans cette étude appartient au groupe Musa AAB, du type Faux Corne, variété « *Harton* » dont la composition biochimique de la pulpe est présentée dans le **tableau 5-3**. De nos jours, peu d'informations sont disponibles dans la littérature concernant le profil biochimique de la banane plantain mûre. La plupart du temps, les études sont menées sur la banane dessert ou plantain vert mature.

La teneur en eau est un des critères de qualité importants pour un aliment. Elle contribue à la valeur nutritionnelle des aliments, leurs propriétés sensorielles (texture, saveur, couleur) voir leurs stabilité ainsi qu'aux diverses réactions chimiques se produisant dans les dits aliments. La pulpe de plantain mûre présente ici en moyenne une humidité de 67%. Cette valeur est attribuable à l'eau hygroscopique vaporisée après séchage dans une étuve à air ventilée durant 24 heures. Notre teneur en eau est proche de celle référencée dans l'étude de Aurore *et al.*, 2009 dans le cas des bananes plantains mûres du genre *Musa paradisiaca* en général. On estime que cette teneur en eau augmente en fonction du taux de mûrissement parce qu'à l'état vert (stade 2 de maturité) sa TE est environ de 61,0% selon Totte *et al.*, 1996, ou 64,5% selon Ikoko et Kuri, 2007.

Tableau 5-3 : Composition physicochimique de la banane plantain

	g/100g (base humide)
Eau ^a	67,07± 0,64
Protéines ^{a,b}	2,73±0,24
Huile ^a	0,30± 0,02
Cendres ^a	0,66±0,09
Hydrates de carbone ^{a,c}	29,25± 0,92 (a,b)
Amidon ^{a,d}	10±00
pH ^a	4,76±0,10
Brix	4

^a Moyenne de trois répétitions ± écart type.

^b protéines= NT(%) x6,25

^c teneur en hydrates de carbones calculée par différence, selon : (a) : Assemand *et al.*, 2012 ; (b) : Karazhiyan *et al.*, 2011)

^d AOAC, 1997

Le taux de protéines contenue dans la pulpe de plantain est estimé à 2,73%, une valeur relativement supérieure à celle mentionnée dans les travaux de Aurore *et al.*, 2009. Elle présente également une faible teneur en huile et en cendres respectivement de 0,30% et

0,66%. La production d'acides organiques tels que les acides maliques et citriques contribuent à la variation du pH des fruits du bananier du stade 1 au stade 7 de maturation. Au stade de récolte (stade 2), le pH est généralement autour de 6, et diminue jusqu'au stade 7 (jaune avec des points noirs) pour atteindre une valeur de 4,76 notamment dans notre cas. Assemand *et al.*, 2012 ont présenté dans leur étude la variation du pH de deux variétés de plantain « Agnrin » et « Orishele » à l'état vert et mûr. Leurs travaux confirment que le pH diminue au fur et à mesure que le fruit mûrit. Il varie de 5,86 à 4,06 et de 6,06 à 4,85 respectivement. Ce paramètre est considéré comme l'un des critères de qualité et de maturité des fruits, car la saveur des fruits dépend d'un équilibre entre le sucre et les acides présents. La pulpe présente une teneur moyenne de 29,25% en sucres totaux. Son augmentation au cours du mûrissement des fruits constitue de ce fait un réel indice de maturité ou stade de mûrissement.

Parmi les sucres, l'amidon constitue le composant le plus abondant dans la pulpe de la banane plantain à l'état vert. A lui seul, il représente une teneur moyenne de 86,5% de la masse totale des sucres totaux (Gibert *et al.*, 2009 ; 2010). Pendant la maturation, l'amidon est hydrolysé par voie enzymatique provoquant une accumulation d'autres sucres moins complexe appelés oligo et monosaccharides comme le saccharose, le glucose et le fructose. L'accumulation de ces derniers sucres confère au fruit, un goût plutôt sucré. Certains auteurs (Marriott et Lancaster, 1983) soulignent que l'hydrolyse de l'amidon dans le plantain, se trouve être lente et moins complexe, et se poursuit lorsque le fruit mûrit. La fraction de saccharose contenue dans le jus extrait du plantain a été mesurée donnant une valeur de 4°Brix.

Le profil de texture d'un fruit fait partie des critères de qualités sensorielles pour sélectionner un bon produit. Il est souvent perçu sous le terme de dureté ou fermeté. A l'état vert, le plantain présente une texture très ferme qui évolue au cours de la maturation (ramollissement). Cette perte de fermeté au cours du mûrissement est due à trois facteurs: l'hydrolyse de l'amidon en sucres, la rupture de l'intégrité de la lamelle moyenne cellulaires et à un effet d'osmose (Palmer, 1971 ; Grierson *et al.*, 1981; Brady, 1987 ; Tucker et Grierson, 2013 ; Smith *et al.*, 1989 ; Jackman et Stanley, 1995 ; Salvador *et al.*, 2007 ; Emaga *et al.*, 2008). En moyenne, la dureté du plantain dans notre étude à l'état frais varie entre 50 et 80 N.

5.2.2 Analyses morphologiques et gélatinisation de l'amidon de la banane plantain

Analyse morphologique de la banane plantain

Le **tableau 5-4** résume les caractéristiques morphologiques de la banane plantain mature. La masse, l'épaisseur (circonférence) et la longueur du fruit ont été évalués sur 12 échantillons.

Tableau 5-4 : Caractéristiques morphologiques de la banane plantain

Echantillon	poids total (g)	longueur (cm)	épaisseur de la banane entière (cm)	masse de la pulpe (g)	perte en parage (g)
1	320	28	4,5	200	120
2	260	28	4,5	180	80
3	320	29	5,5	200	120
4	320	29	4,25	200	120
5	300	21	5	200	100
6	260	21	4,5	200	60
7	300	23,5	4,95	200	100
8	320	27,5	4,5	240	80
9	240	22	3,9	195	45
10	400	34	4,5	260	140
11	380	25	5	260	120
12	220	19	3,84	180	40

La masse a été mesurée en même temps à partir de la banane plantain entière et de la pulpe, uniquement après pelage et séparation de la peau sur une balance électronique. La longueur a été mesurée sur chaque fruit à l'aide d'un pied à coulisse en plaçant l'instrument depuis le pédoncule jusqu'à l'apex. L'épaisseur a été déterminée en mesurant chaque fruit dans sa partie médiane, précisément là où il y a la partie la plus épaisse.

Température de gélatinisation de l'amidon de la banane plantain par DSC

L'analyse thermique différentielle (ATD) nous a permis de détecter les températures de transition (début ou onset (T_o), de pointe maximale où se produit la réaction (T_p) et finale ou endset (T_e) et l'enthalpie (ΔH), l'énergie associée à la gélatinisation de l'amidon. Peu

d'information sont répertoriées dans la littérature concernant le profil thermique de la banane plantain mûre. Les données qui résultent du profil thermique de la pulpe fraîche de la banane plantain, sont présentées dans le **tableau 5-5**.

Tableau 5-5 : paramètres d'analyse thermique différentielle de l'amidon de la banane plantain mûre.

Echantillon	T _{onset} (°C)	T _{pic} (°C)	T _{end} (°C)	ΔH gél (J/g)	ΔT (°C)
Pulpe fraîche	84,34±01,849	86,260±1,222	91,660±1,483	0,654±0,333	7,320±07,19

T_{onset}= température d'induction ou début ; T_{pic}= température de pointe de la réaction ;
T_{end}= température finale de la réaction.

Suivant le chromatogramme, un seul pic exothermique a été détecté, identifiant ainsi la gélatinisation de l'amidon natif de la banane plantain. La température de gélatinisation (T_p) est située à 86,26±1,22°C, elle débute à T_o=84,34±01,85°C et se termine à T_e=91,66±1,48.

L'enthalpie de gélatinisation présente une valeur très faible (0,65±0,33J/g). Celui-ci mesure l'index de cristallinité (Teng *et al.*, 2013) et est considéré pour certains auteurs (Karim *et al.*, 2008) comme un indice de perte moléculaire à l'intérieur du granule d'amidon. La plage de température de gélatinisation (ΔT) est de 7,32±07 à 19°C. Celle-ci varie en fonction du degré d'hétérogénéité de la structure cristalline du granule d'amidon comme le précisent Gunaratne et Hoover (2002) ; Nwokocha et Williams (2009). Les résultats trouvés ici sont un peu éloignés de ceux trouvés par Nwokocha et Williams (2009) et Hernandez-Jaimes *et al.*, (2013).

5.3 OPTIMISATION DES CONDITIONS DE FRITURE PROFONDE PAR LA METHODE DES SURFACES DE REPONSE

5.3.1 Utilisation d'un plan d'expériences de Doehlert

Les conditions de friture profonde de la banane plantain ont été optimisées à l'aide d'un plan d'expériences généré à l'aide d'une matrice de Doehlert. Le **Tableau 4-2** montre les seize expérimentations permettant de connaître les effets et les interactions entre les principaux

paramètres (température, temps, quantité de banane plantain) dont le domaine de variation à préalablement été établi par des expérimentations préliminaires.

Le modèle quadratique (**Equation 4-2**) contenant 10 coefficients, a été utilisé pour décrire les interactions entre les réponses suivantes :

- La teneur en huile (TH) des disques de banane plantain déterminée par extraction par la méthode Soxhlet (AOAC, 1990);
- La teneur en eau (TE)
- La dureté des disques de banane plantain après friture profonde par méthode instrumentale (Llyod)
- La cohésion (Co)
- L'adhésion (Ad)
- La masticabilité (Mas)
- La rigidité (Ri)
- La mesure de couleur ΔE

Il est ainsi possible de mettre en évidence l'influence des paramètres en fonction de la nature de l'huile utilisée en friture profonde (huile Frial ou huile de soja).

5.3.2 Réponses et modèles mathématiques étudiés avec l'huile Frial dans le procédé de friture profonde de la banane plantain

Les réponses obtenues sur l'étude de MSR et des différents effets dans le cadre de l'huile Frial sont présentés dans les **tableaux 5-6** et **5-7**. Il apparaît notamment que la variable « temps de cuisson X_2 » a un effet significatif à 95% inhibiteur très important sur la teneur résiduelle en eau du produit (-3,319*). La quantité de banane plantain introduite à chaque cuisson aurait pu jouer également un rôle important (0,775), limitant le transfert d'eau compte tenu d'un transfert thermique moins important dans la friteuse (le bain d'huile restant constant). Des interactions importantes entre « température x temps » et « température x quantité de plantain » restent aussi très importantes.

Concernant la teneur en huile résiduelle de la banane plantain, nous pouvons observer un phénomène inverse concernant le paramètre temps qui a un effet significatif à 99,9% important mais dans ce cas, positif (+2,179***) indiquant que plus la durée du procédé de friture profonde est importante plus la teneur en lipides est élevée. En effet, lors de l'introduction de l'aliment dans le bain d'huile, l'eau contenue dans la banane plantain se vaporise et tente de sortir de la matrice sous la pression. La vitesse de vaporisation de l'eau est proportionnelle à la différence de température entre l'huile et le point d'ébullition de l'eau. Il s'en suit alors une déshydratation et une imprégnation de la matrice par l'huile qui se loge dans les interstices libérés par l'eau. On enregistre aussi une très forte interaction entre la durée de la friture et la quantité de plantain, en ce qui concerne la teneur résiduelle en huile (-4,886***).

La dureté des disques calibrés de plantain a été observée et a montré qu'elle est affectée négativement par la température (-4,4*) et par le paramètre quantité qui influence fortement la structure après cuisson (+10, 25). De même, de forts effets d'interactions ont été observés entre la température/durée (+9,52) et la quantité/durée (+13,89). L'effet de la température sur la dureté est associée à une augmentation de la pression de gonflement au cours de la gélatinisation de l'amidon et les phénomènes de dégradation hydrothermique, ce qui conduit à une rupture de la paroi cellulaire (Graham-Acquaah *et al.*, 2014). L'effet positif du terme du premier ordre du substrat (+10,25) indique que la dureté est fortement corrélée avec la quantité de plantain introduit dans la friteuse, en raison d'une chute brutale de la température en fonction de la quantité de plantain introduite. Cette variation de température limitera la cuisson sur la durée de friture imposée. Le modèle de régression explique 82,4% de la variabilité totale de la dureté du plantain frit.

Tableau 5-6 : Expérimentations générées par la matrice de Doehlert et réponses obtenues concernant la friture du plantain dans l'huile Frial.

Exp,	Température (°C)	Temps (min)	Quantité (g)	TE (%)	TH (%)	Dur (N)	Co	Ad (N)	Mas (N.mm)	Ri (N/mm)	L*	a*	b*	ΔE
1	180	2,5	180	52,36	9,83	41,02	1,02	4,17	5,63	10,59	41,74	12,43	26,91	31,32
2	160	2,5	180	53,26	11,19	55,05	1,12	4,83	13,5	11,08	47,03	5,02	25,94	20,88
3	175	4	180	53,28	10,34	44,63	1,03	3,47	4,29	11,19	51,79	5,79	33,75	24,96
4	165	1	180	59,17	5,76	58,29	3,16	7,72	27,59	8,49	61,68	6,93	46,83	17,45
5	175	1	180	57,59	5,40	45,82	1,45	4,85	8,61	9,4	53,71	7,57	38,58	15,72
6	165	4	180	49,94	8,89	40,62	1,96	6,17	15,93	10,93	60,61	5,27	41,55	15,41
7	175	3	200	52,86	9,53	61,32	1,12	2,99	3,26	7,52	41,69	6,57	24,93	28,20
8	165	2	160	55,11	8,68	40,14	2,6	6,69	22,9	9,04	41,60	5,35	23,88	21,90
9	175	2	160	55,06	7,80	38,62	1,47	4,49	18,27	9,5	50,18	6,12	30,91	23,65
10	170	3,5	160	54,42	12,22	34,98	2,21	5,87	16,94	8,22	39,76	7,91	20,79	28,95
11	165	3	200	57,70	9,34	58,46	1,24	3,16	3,66	7,93	41,46	6,28	23,44	25,56
12	170	1,5	200	56,23	10,43	44,18	0,92	3,05	3,7	8,38	45,82	6,67	25,39	17,59
13	170	2,5	180	54,68	8,13	46,00	0,71	2,94	3,06	12,81	40,87	8,58	25,34	22,75
14	170	2,5	180	52,10	7,35	41,83	0,86	3,37	3,88	11,69	40,83	6,86	24,68	23,40
15	170	2,5	180	52,17	8,13	45,59	0,85	3,23	3,67	10,3	43,26	5,98	25,09	20,61
16	170	2,5	180	54,56	7,35	46,00	0,98	2,8	3,19	8,44	40,14	4,06	24,19	24,19

TH : teneur en huile ; TE : teneur en eau ; Dur : dureté ; Co : cohésion ; Ad : adhésion ; Mas : masticabilité ; Ri : rigidité, ΔE : différence de couleur

On observe une évolution de la coloration de la banane plantain frite qui dépend fortement de la température (+4,014*) ainsi que du temps de cuisson qui ont des effets positifs (+3,863*) avec un effet significatif de l'interaction très forte entre ces deux paramètres (+6,519).

En ce qui concerne la texture de la banane plantain frite, l'effet de la température semble le plus marqué (+1,486) avec une interaction forte « durée x quantité ».

Tableau 5-7: Coefficients de régression multiple et du modèle polynomial quadratique pour les effets principaux et les interactions entre les différents facteurs étudiés pour les réponses : teneur en eau, teneur en lipides, dureté et couleur de la banane plantain après friture dans l'huile Frial.

Variables	coefficients			
	Teneur en eau (%)	Teneur en lipides (%)	Dureté (N)	ΔE
Moyenne	53,378***	7,742***	44,855***	22,739***
Termes linéaires				
X ₁ (température)	-0,175	-0,291	-4,400*	4,014*
X ₂ (temps)	-3,319*	2,179***	-2,450	3,863*
X ₃ (quantité)	0,775	0,123	10,250**	-0,437
Termes quadratiques				
X ₁₁	0,670	2,771**	3,182	3,366
X ₂₂	2,336	-1,116	2,254	-6,927*
X ₃₃	2,401	2,474**	0,780	3,492
Interactions				
X ₁₂	2,141	1,048	9,519*	6,519
X ₁₃	-2,772	0,285	-0,680	-2,374
X ₂₃	0,918	-4,886***	13,887*	-1,079
R ²	0,75	0,96	0,83	0,84

* 1% < α < 5%; ** 1% = α < 1%; *** α ≤ 1%

L'analyse des effets des paramètres de fritures sur les réponses étudiées a permis à partir de l'équation polynomiale (**équation 4-2**) de tracer des courbes d'isoréponses générées par le logiciel NEMROD, permettant d'optimiser ces réponses. Les **figures 5-1, 5-4, 5-5 et 5-8** présentent l'optimisation de la teneur en eau, de la teneur en huile, de la dureté et de la couleur au cours du procédé de friture profonde de la banane plantain. Les **figures 5-2 et 5-3** présentent les chemins optimaux permettant de minimiser les pertes en eau et l'absorption d'huile, tandis que les **figures 5-7 et 5-6** présentent les chemins optimaux permettant de

maximiser la coloration et la dureté, par la solubilisation de la lamelle médiane et la gélatinisation de l'amidon en fin de friture.

En fixant le niveau de l'un des trois paramètres au centre du domaine expérimental, il est possible de suivre l'évolution des deux autres paramètres. En observant les **figures 5-1, 5-4, 5-5 et 5-8** et en se focalisant sur celles dont le paramètre quantité (X_3) est fixé à 180 g, nous constatons que la teneur en eau est située entre 51,50 et 57,90 ; la teneur en huile entre 5,40 et 10,20% ; la dureté entre 44,60 et 59 ; la différence de couleur entre 15,40 et 29,40 pour une température de friture variant entre 160 et 180°C et un temps de friture variant entre 0,8 et 4,2 minutes.

Sur la courbe TE, on note que c'est le paramètre temps de friture qui est le facteur pertinent dans ce cas précis. S'agissant de la TH, on observe des réponses expérimentales en dessous de 8% lorsque le temps de friture est bas. Ces conditions pourraient permettre d'éviter une proportion élevée d'huile dans les échantillons de banane plantain. Par contre pour la dureté et la couleur, les meilleurs résultats expérimentaux sont obtenus en augmentant les deux paramètres (temps et température de friture).

Dans ces mêmes figures (**5-1, 5-4, 5-5 et 5-8**) les variables montrent que la quantité de banane plantain et la température de friture n'ont pratiquement pas d'effet sur les quatre réponses retenues lorsque la durée est fixée à 2,5 minutes. Par contre, lorsque nous nous focalisons sur les courbes d'isoreponses où la température est fixée à 170°C, on constate que la variation des deux autres facteurs (quantité de banane plantain et temps de friture) ont un effet sur les réponses.

L'analyse de l'ensemble des courbes d'isoreponses 2-D montre que les facteurs temps et température de friture sont les facteurs les plus influents pour pouvoir optimiser les réponses. Une température comprise entre 170 et 180°C et un temps compris entre 2,5 et 4,2 minutes pourraient être appropriés pour l'élaboration des meilleures frites de banane plantain en termes de couleur, dureté, teneurs en huile et eau.

Le tracé des courbes du « chemin optimal » (**figures 5-2, 5-3, 5-7 et 5-6**) permet de visualiser le ou les paramètres principaux et le sens directionnel dans lequel faire varier (maximisation ou minimisation) afin d'optimiser une réponse.

L'analyse de l'ensemble des courbes a conduit aux conclusions suivantes :

- Réponse teneur en eau (**figure 5-2**) : l'objectif est de minimiser les pertes en eau. Le chemin optimal nous oriente vers la maximisation où le principal facteur à faire varier est le temps de friture.

- Réponse teneur en huile (**figure 5-3**) : l'objectif est de minimiser l'absorption de l'huile. Le chemin optimal nous oriente vers une minimisation du temps de friture.
- Réponse dureté (**figure 5-6**) : l'objectif est de maximiser la solubilisation de la lamelle moyenne et la gélatinisation de l'amidon. Le chemin optimal nous oriente vers la minimisation de la quantité de banane plantain.
- Réponse couleur (**figure 5-7**) : l'objectif est de maximiser la coloration de la banane plantain pendant la friture. Le chemin optimal nous oriente vers la maximisation de la température de friture.

Les résultats optimaux ont été obtenus par la méthode d'optimisation numérique à partir du logiciel Nemrod. Les conditions optimales obtenues sont les suivantes : température de friture : 170°C ; temps de friture : 3,15 minutes ; quantité de banane plantain : 180g.

Pour confirmer les valeurs obtenues par le plan d'expériences, des essais de validation ont été menés et des résultats proches ont été obtenus.

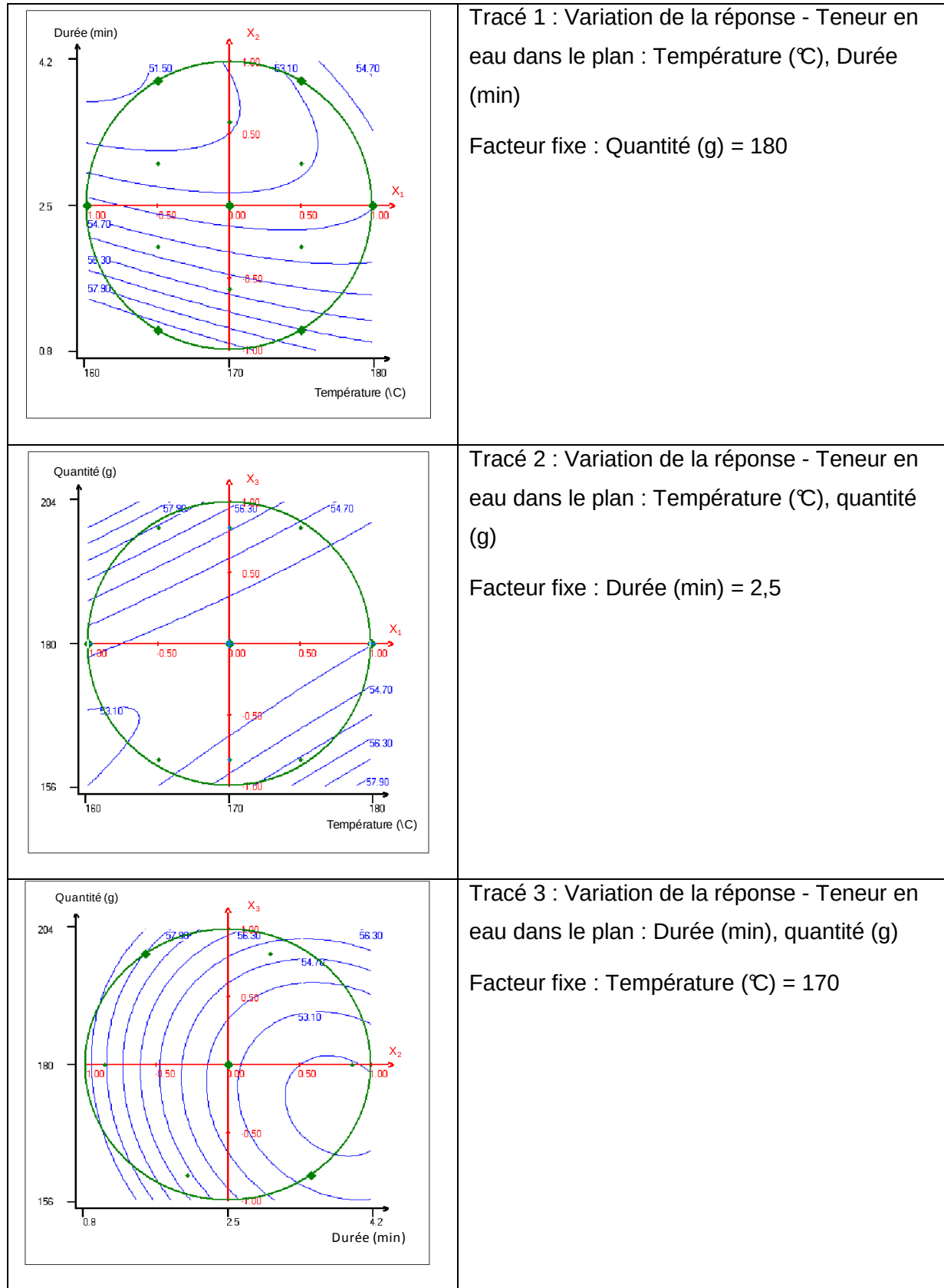


Figure 5-1 : Courbes d'isoréponses de la teneur en eau de la banane plantain frite (Y_1) dans le cas de l'huile Frial.

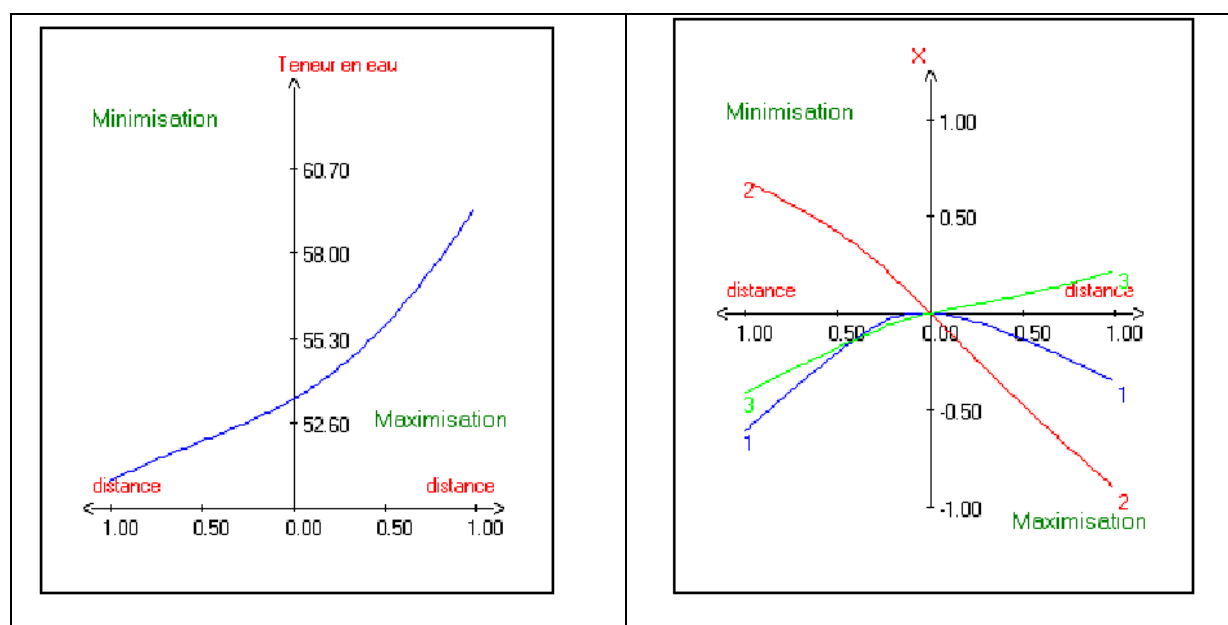


Figure 5-2 : Chemin optimal pour la réponse teneur en eau de la banane plantain après friture

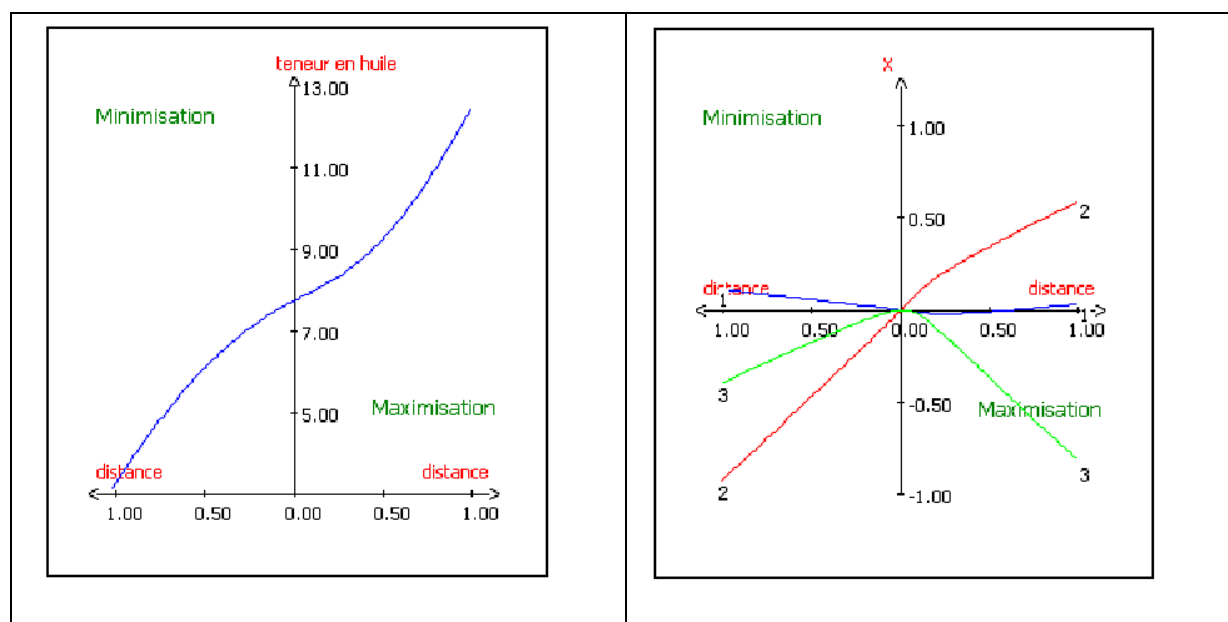


Figure 5-3 : Chemin optimal pour la réponse teneur en huile de la banane plantain après friture

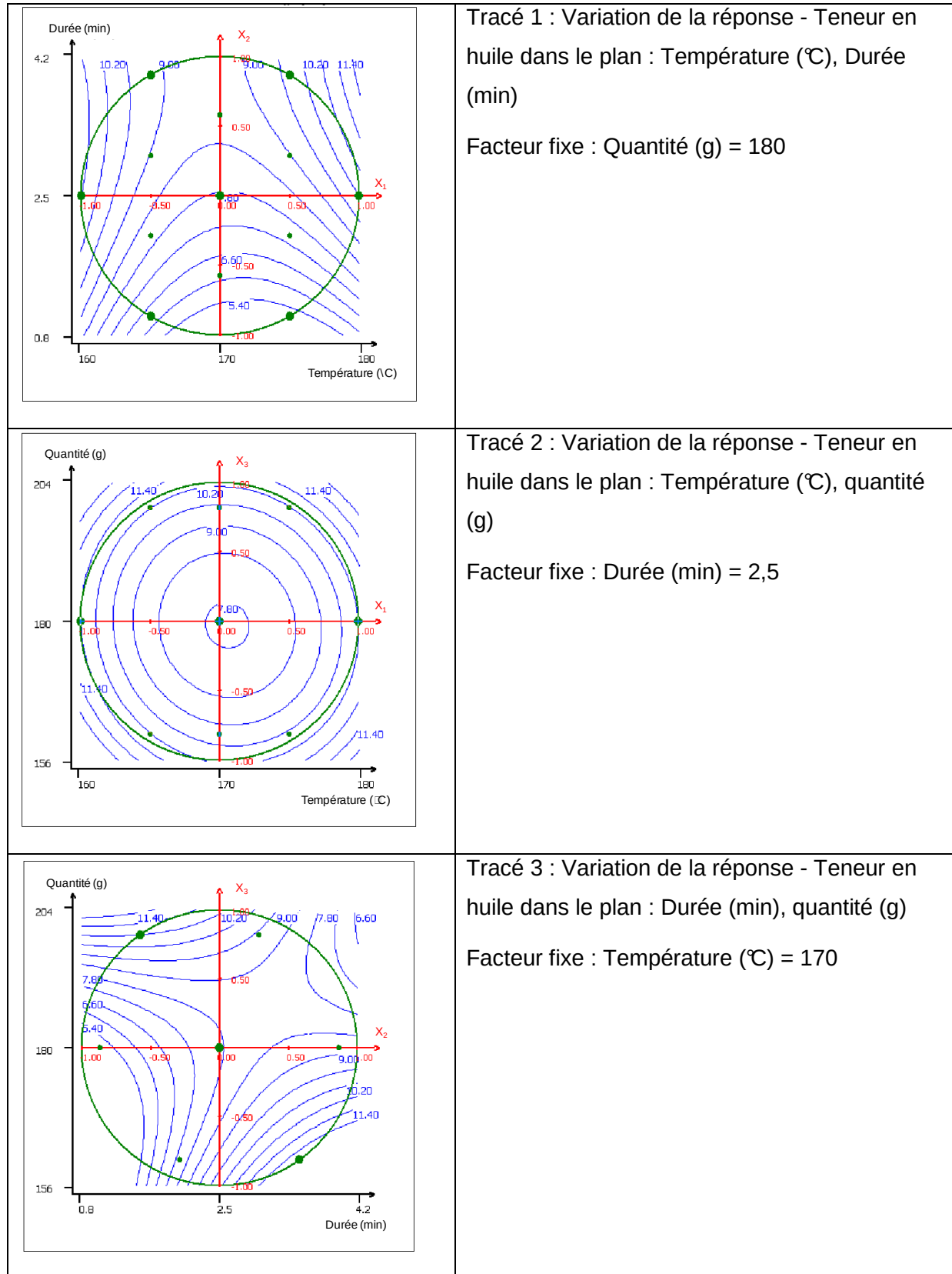


Figure 5-4 : Courbes d'isoréponses de la teneur en huile de la banane plantain frite (Y_2) dans le cas de l'huile Frial

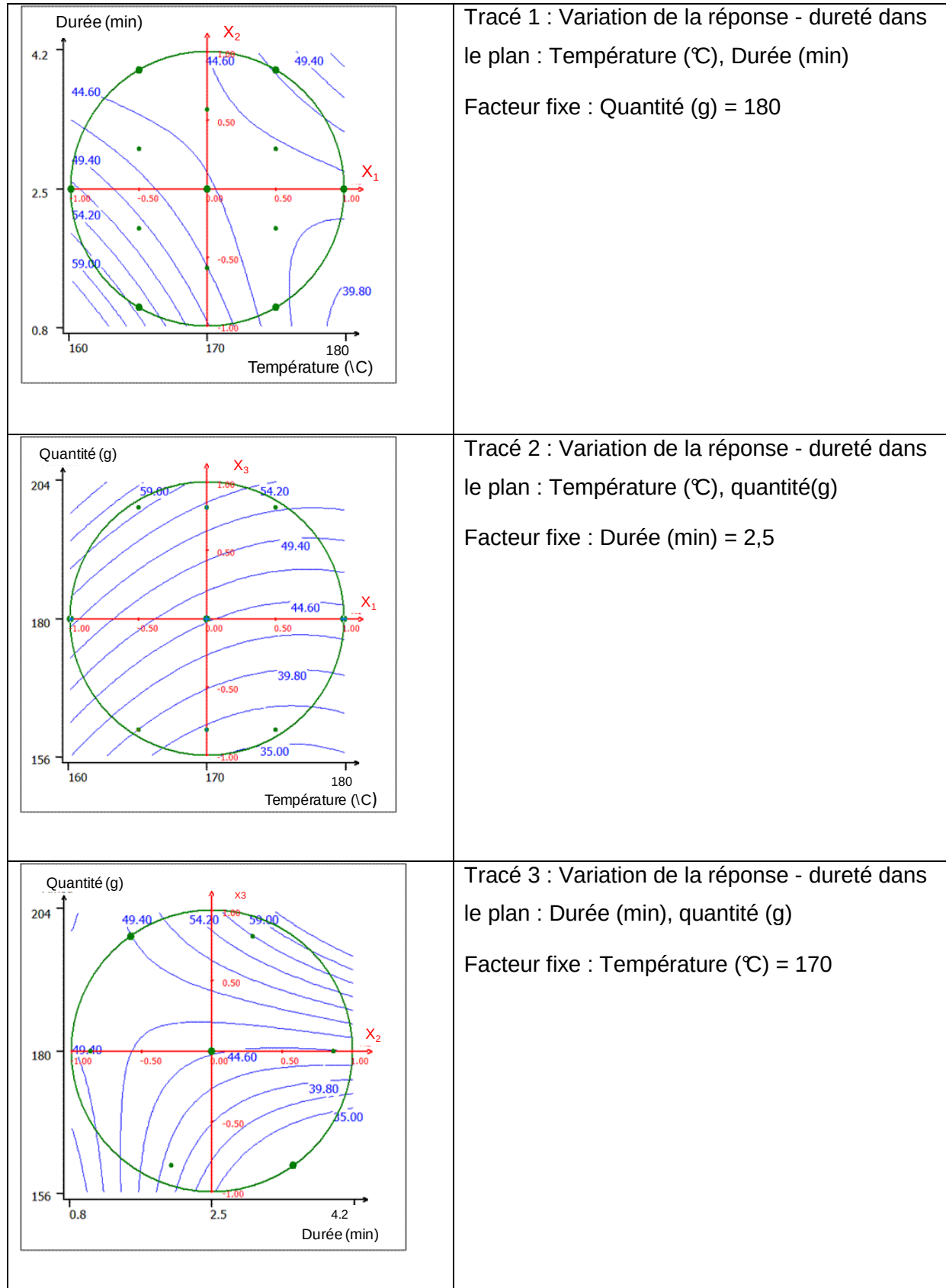


Figure 5-5 : Courbes d'isoréponses de la dureté de la banane plantain frite (Y_3) dans le cas de l'huile Frial

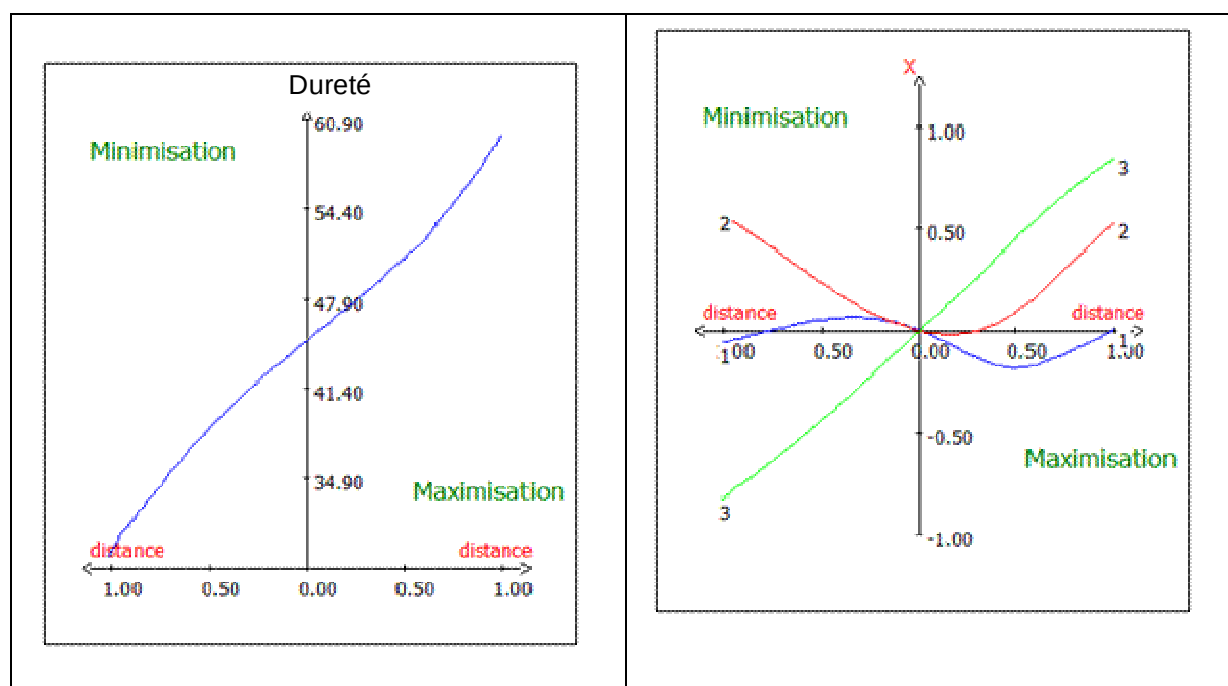


Figure 5-6 : Chemin optimal pour la réponse dureté de la banane plantain après friture

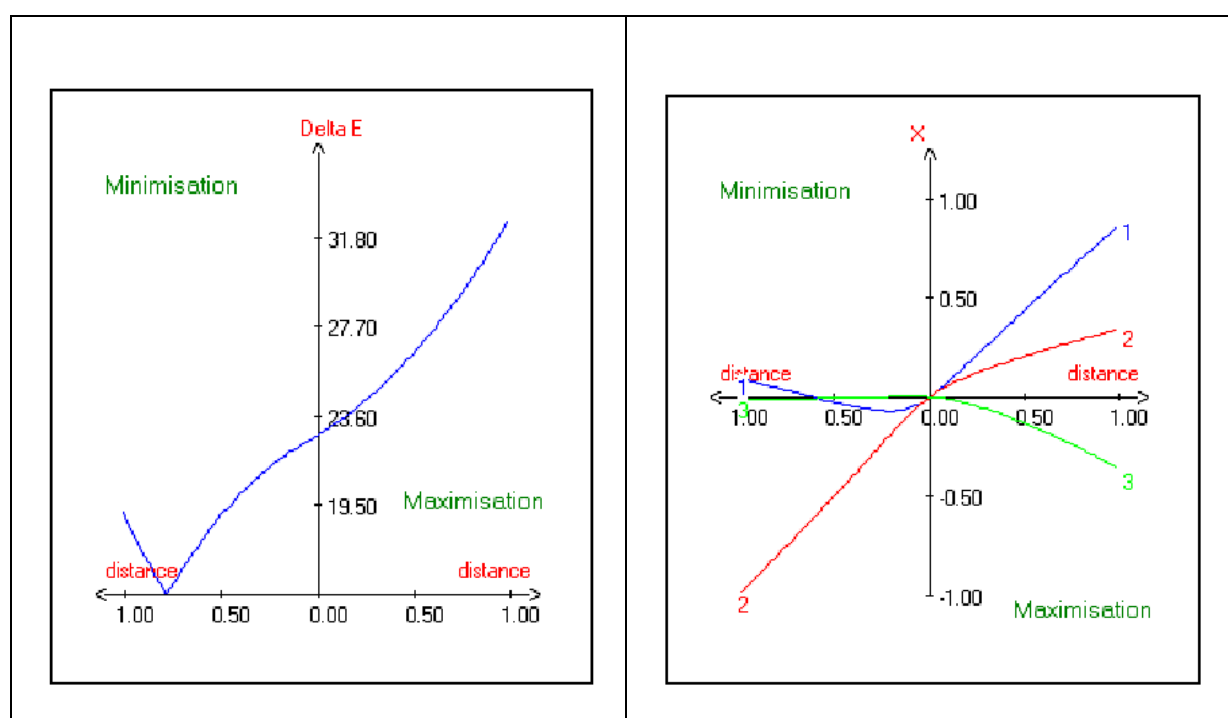


Figure 5-7: Chemin optimal pour la réponse couleur de la banane plantain après friture.

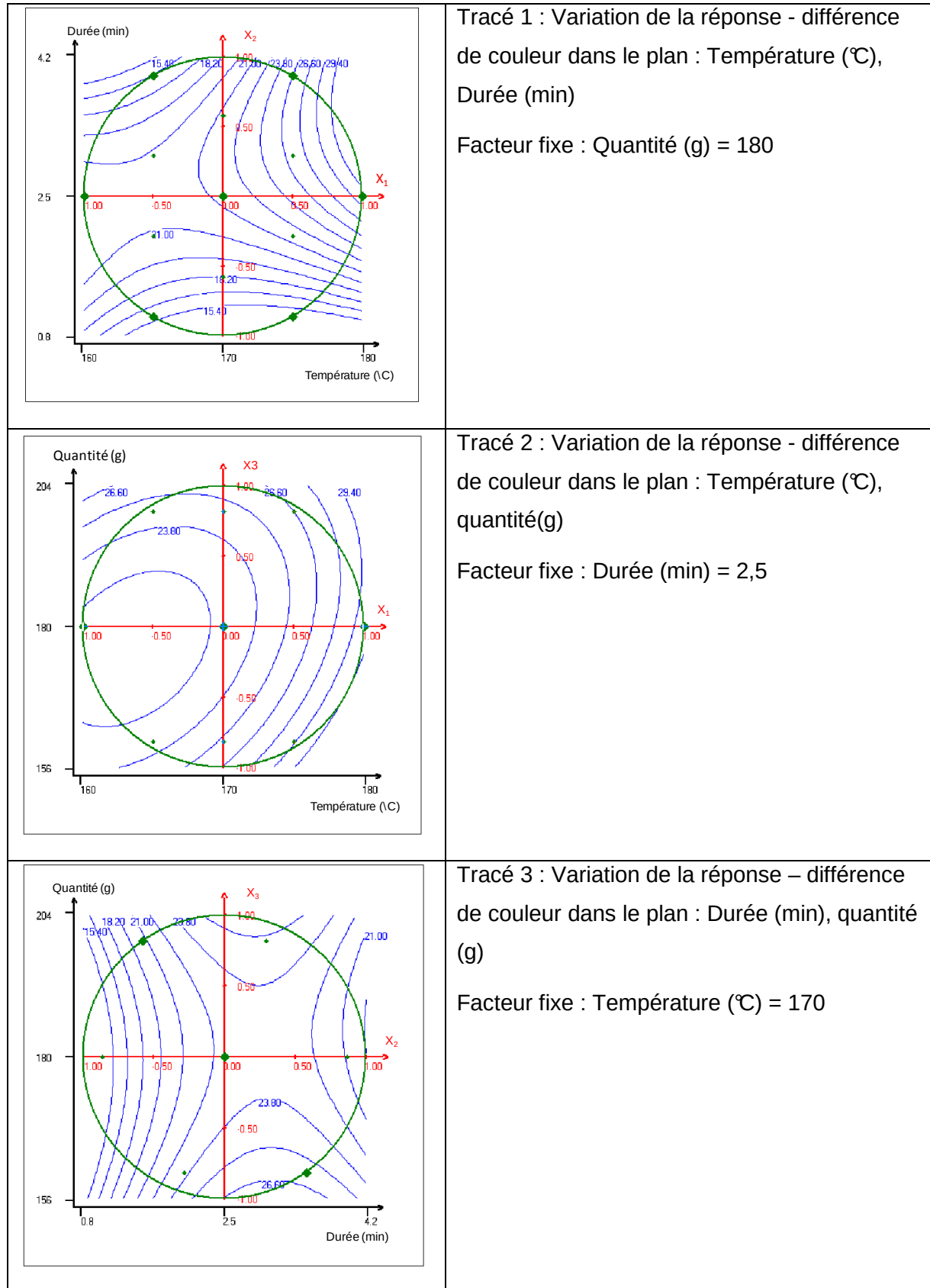


Figure 5-8 : Courbes d'isoréponses de la couleur (ΔE) du plantain frit (Y_4) dans le cas de l'huile Frial.

5.3.3 Réponses et modèles mathématiques étudiés avec l'huile de soja dans le procédé de friture profonde de la banane plantain

Les réponses obtenues par MSR pour l'huile de soja sont présentées dans les **tableaux 5-8** et **5-9**. Comme observé dans le cas précédent, la variable « temps de cuisson X_2 » a un effet significatif très important sur la teneur résiduelle en eau du produit (-3,164***). Dans ce cas-ci, la température de friture (X_1) joue aussi un rôle important (-0,617*), et les coefficients négatifs des deux variables (X_1 et X_2) indiquent que la diminution de la teneur en eau dans le produit augmente avec l'augmentation de ces variables. Ces dernières présentent entre elles de très importantes interactions (+2,845**), comme c'est le cas entre « température x quantité de plantain » (-3,940***), car la quantité de plantain introduite dans le bain de friture joue également un rôle le transfert d'eau. Le modèle de régression explique 84% de la variabilité totale de la TE de la banane plantain frite.

Concernant la teneur en huile résiduelle de la banane plantain, des résultats et conclusions similaires concernant le paramètre temps (+1,082**) ont été observés. Comme avec l'huile Frial, on enregistre une très forte interaction positive (+1,484*) entre la « durée de la friture et la quantité de banane plantain ». Le modèle de régression explique 88% de la variabilité totale de la TH du substrat frit.

Tableau 5-8 : Matrice de Doehlert et réponses obtenues après friture de la banane plantain dans l'huile de soja

Exp.	Température (°C)	Temps (min)	Quantité (g)	TE (%)	TH (%)	Dur (N)	Co	Ad (N)	Mas (N.mm)	Ri (N/mm)	L*	a*	b*	ΔE
1	180	2,5	180	57,89	5,16	46,31	1,27	3,29	5,23	6,58	51,89	7,00	29,04	18,75
2	160	2,5	180	54,07	5,13	55,01	1,30	2,81	6,64	5,78	51,70	4,58	29,89	18,81
3	175	4	180	53,79	7,23	51,09	1,31	2,98	5,16	5,95	39,62	8,14	25,03	31,98
4	165	1	180	59,41	4,61	57,65	1,52	4,15	10,20	6,81	63,28	4,89	40,50	12,09
5	175	1	180	56,49	4,71	31,07	1,45	5,86	15,42	10,26	55,50	6,33	34,37	15,05
6	165	4	180	57,93	6,04	49,22	1,50	2,29	4,52	4,27	41,96	4,90	26,54	28,97
7	175	3	200	57,41	5,91	55,02	1,51	2,68	5,23	4,72	47,73	5,01	28,99	23,24
8	165	2	160	61,81	4,82	54,38	1,57	2,53	5,68	4,03	52,36	3,77	29,12	18,65
9	175	2	160	61,04	5,59	52,20	1,57	2,50	5,63	4,72	48,48	1,95	28,59	22,51
10	170	3,5	160	55,25	5,11	47,42	1,41	3,42	6,81	6,45	43,26	5,28	32,06	28,32
11	165	3	200	50,64	4,68	52,90	1,31	3,70	7,19	7,96	52,18	3,85	35,28	18,39
12	170	1,5	200	54,55	3,52	53,30	0,97	2,59	3,78	10,04	57,22	3,16	35,37	13,96
13	170	2,5	180	54,06	4,72	50,42	1,02	2,77	3,63	9,82	56,22	2,60	34,73	15,04
14	170	2,5	180	52,56	4,67	52,46	0,87	2,37	2,73	11,97	56,34	3,77	36,07	15,27
15	170	2,5	180	53,33	5,03	53,61	0,90	2,55	2,96	12,77	45,15	2,57	26,68	26,04
16	170	2,5	180	55,42	5,60	52,16	1,12	2,08	3,29	6,75	48,17	4,47	34,21	22,56

TH : teneur en huile ; TE : teneur en eau ; Dur : dureté ; Co : cohésion ; Ad : adhésion ; Mas : masticabilité ; Ri : rigidité ; ΔE : différence de couleur

Tableau 5-9: Coefficients du modèle polynomial quadratique pour les effets principaux et les interactions entre les différents facteurs étudiés pour les réponses teneur en eau, teneur en lipides, dureté et couleur après friture dans l'huile de soja.

Variables	coefficients			
	Teneur en eau (%)	Teneur en lipides (%)	Dureté (N)	ΔE
Moyenne	54,378***	5,003***	52,273***	19,727***
Termes linéaires				
X ₁	-0,617*	0,391	-5,273**	1,820
X ₂	-3,164***	1,082**	1,756	9,425**
X ₃	0,449	-0,331	1,475	-2,835
Termes quadratiques				
X ₁₁	-1,567**	0,139	-1,498	-0,945
X ₂₂	1,342*	0,811	-6,035*	3,377
X ₃₃	1,534*	-0,387	2,446	1,067
Interactions				
X ₁₂	2,845**	0,632	16,419**	0,024
X ₁₃	-3,940***	-0,067	-3,165	0,590
X ₂₃	0,827	1,484*	3,021	0,902
R ²	0,836	0,877	0,789	0,799

* 1% < α < 5%; ** 1‰ = α < 1%; *** $\alpha \leq 1‰$

La dureté des disques de banane plantain a montré qu'elle est significativement négativement affectée par la température (-5,273**). De forts effets d'interactions ont été observés entre la température/durée (+16,419**) et la quantité/durée (+3,021). Le modèle de régression explique 79% de la variabilité totale de la dureté de la banane plantain frite.

En ce qui concerne l'évolution de la coloration du plantain frit, l'effet de la durée semble le plus marqué (+9,425**) avec une interaction positive plus élevée entre « durée x quantité » (+0,902). Le modèle de régression explique 80% de la variabilité totale de la couleur du substrat frit.

Comme avec l'huile Frial, des courbes d'isoreponses et les chemins optimaux dans le cadre de l'huile de soja ont été tracées pour optimiser les réponses. Ces courbes sont représentées par les **figures 5-9 à 5-16**.

Comme avec l'huile Frial, nous avons procédé à une discussion sur l'ensemble des courbes d'isoreponses 2-D obtenues des essais expérimentaux avec l'huile de soja. Nous avons constaté beaucoup de similitudes avec l'huile Frial sur la majorité des réponses analysées.

L'analyse de l'ensemble des courbes d'isoréponses 2-D a aussi montré dans ce cas, que les températures et temps de friture sont les facteurs les plus influents pour pouvoir optimiser les réponses. Une température comprise entre 170 et 180 et un temps compris entre 2,5 et 4,2 minutes pourraient être appropriés pour élaborer des disques de banane plantain « conformes » en termes de couleur, dureté, teneurs en huile et eau.

Le tracé des courbes du « chemin optimal » (**figures 5-10, 5-11, 5-14 et 5-15**) permet de visualiser le ou les paramètres principaux et le sens directionnel dans lequel faire varier (maximisation ou minimisation) afin d'optimiser une réponse.

L'analyse de l'ensemble des courbes a conduit aux conclusions suivantes :

- Réponse teneur en eau (**figure 5-10**) : l'objectif est de minimiser les pertes en eau. Le chemin optimal nous oriente vers la maximisation où le principal facteur à faire varier est le temps de friture.
- Réponse teneur en huile (**figure 5-11**) : l'objectif est de minimiser l'absorption de l'huile en minimisant le temps de friture.
- Réponse dureté (**figure 5-14**) : l'objectif est de maximiser la gélatinisation de l'amidon en maximisant la température de friture.
- Réponse couleur (**figure 5-15**) : l'objectif est de maximiser la coloration de la banane plantain. Le chemin optimal nous oriente vers la maximisation de la durée de friture.

Les conditions optimales obtenues sont les suivantes : température de friture : 170°C ; temps de friture : 3,00 minutes ; quantité de banane plantain : 180 g

Pour confirmer les valeurs obtenues par la méthodologie des plans d'expériences, des essais expérimentaux ont été menés pour valider les résultats obtenus par modélisation.

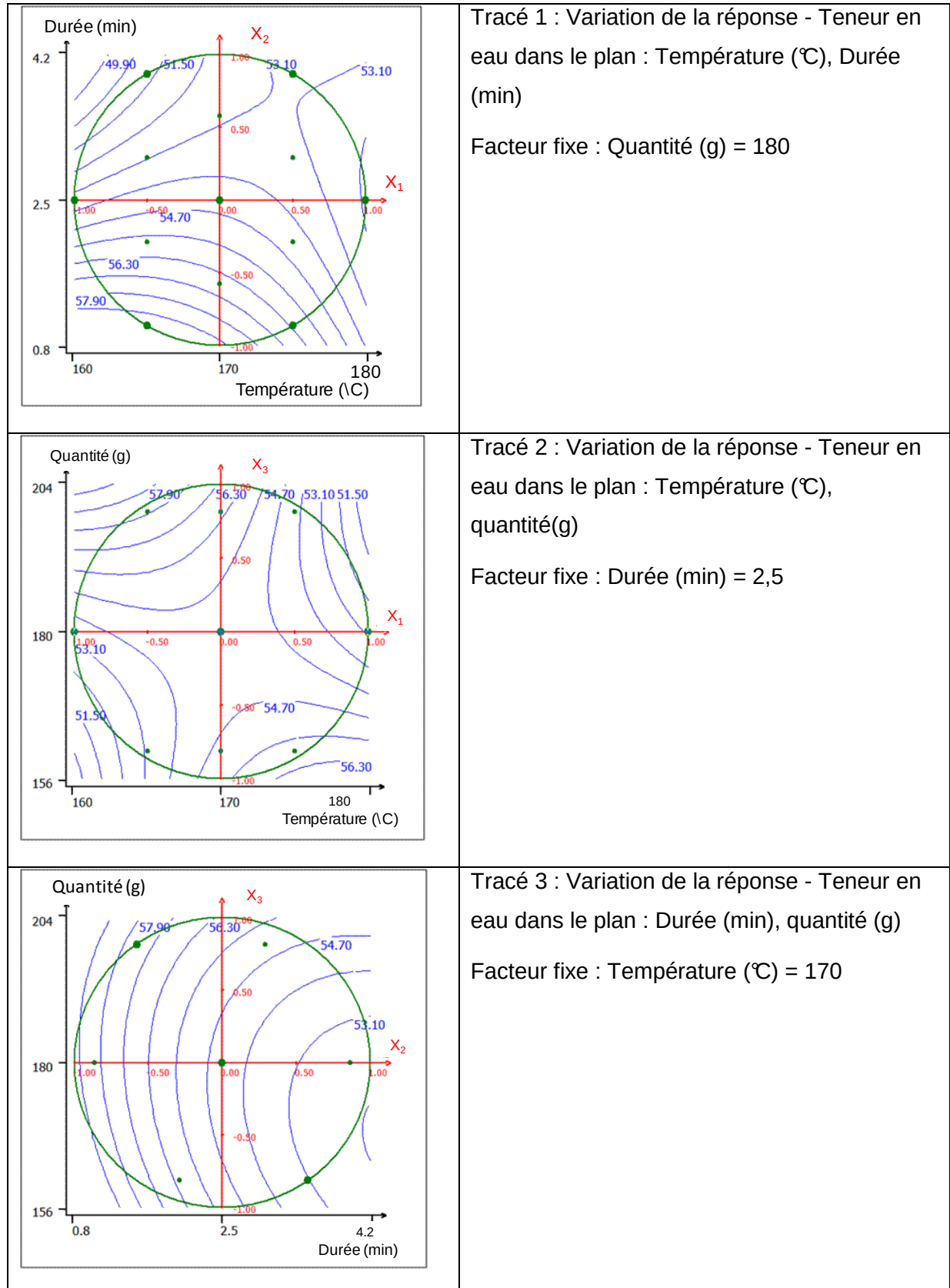


Figure 5-9 : Courbes d'isorréponses de la teneur en eau de la banane plantain frite (Y_1) dans le cas de l'huile de soja.

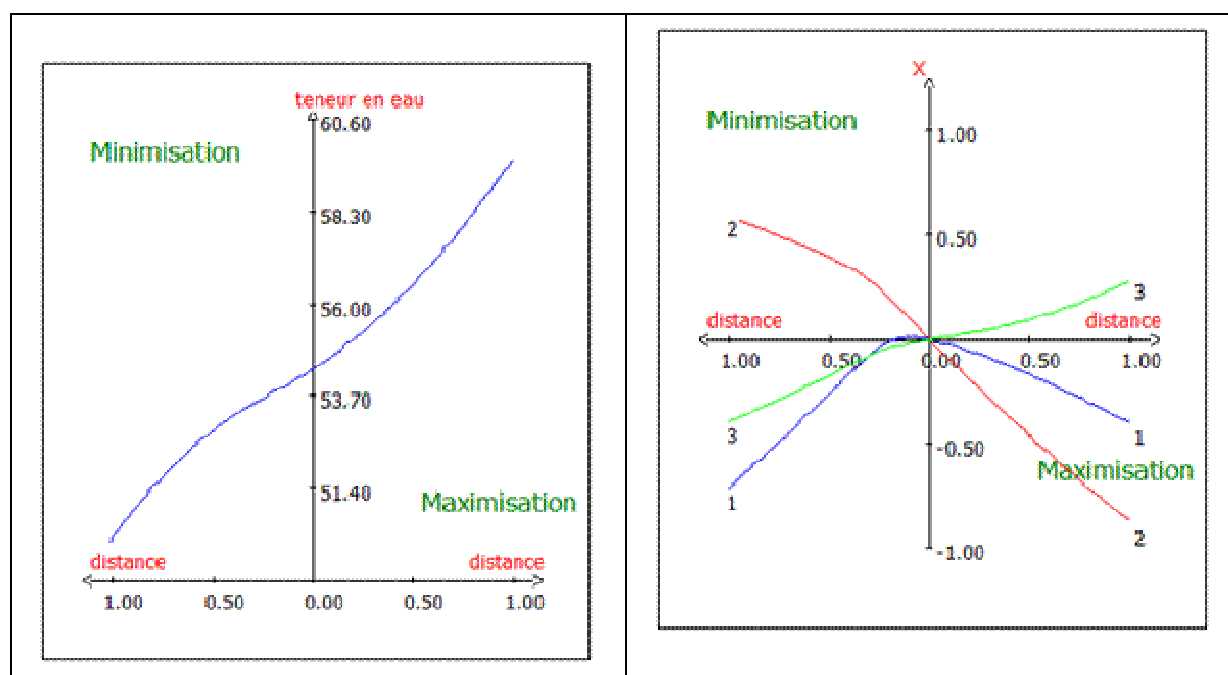


Figure 5-10 : Chemin optimal pour la réponse teneur en eau de la banane plantain après friture avec l'huile de soja

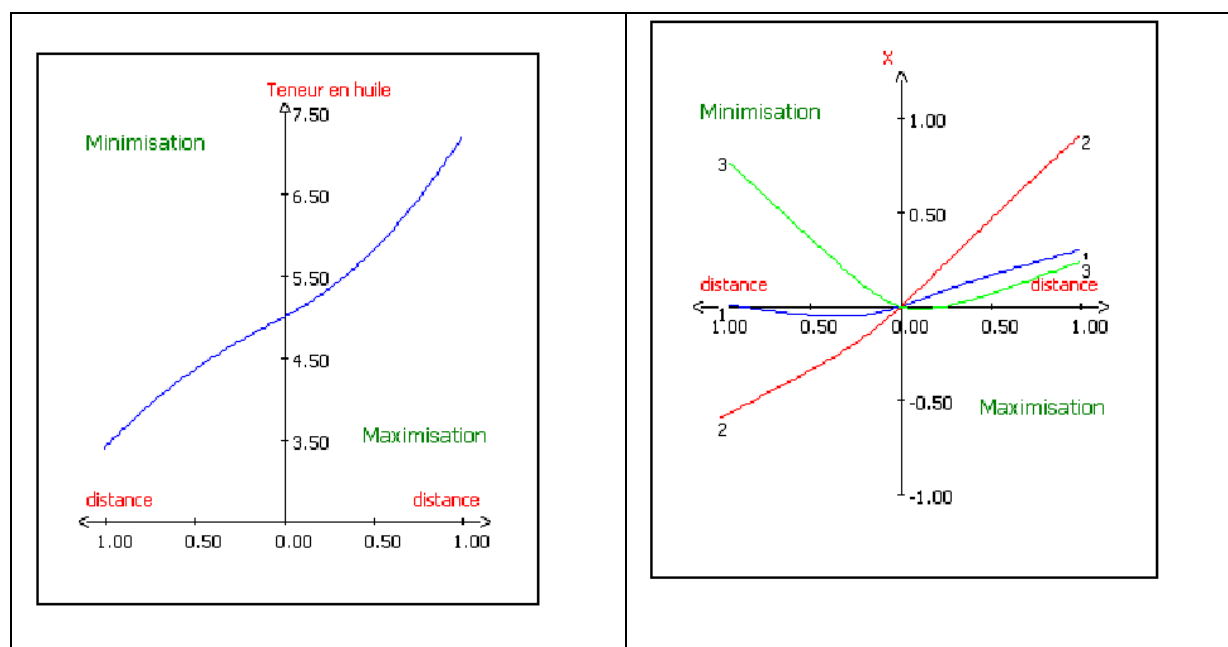


Figure 5-11 : Chemin optimal pour la réponse teneur en huile de la banane plantain après friture avec l'huile de soja

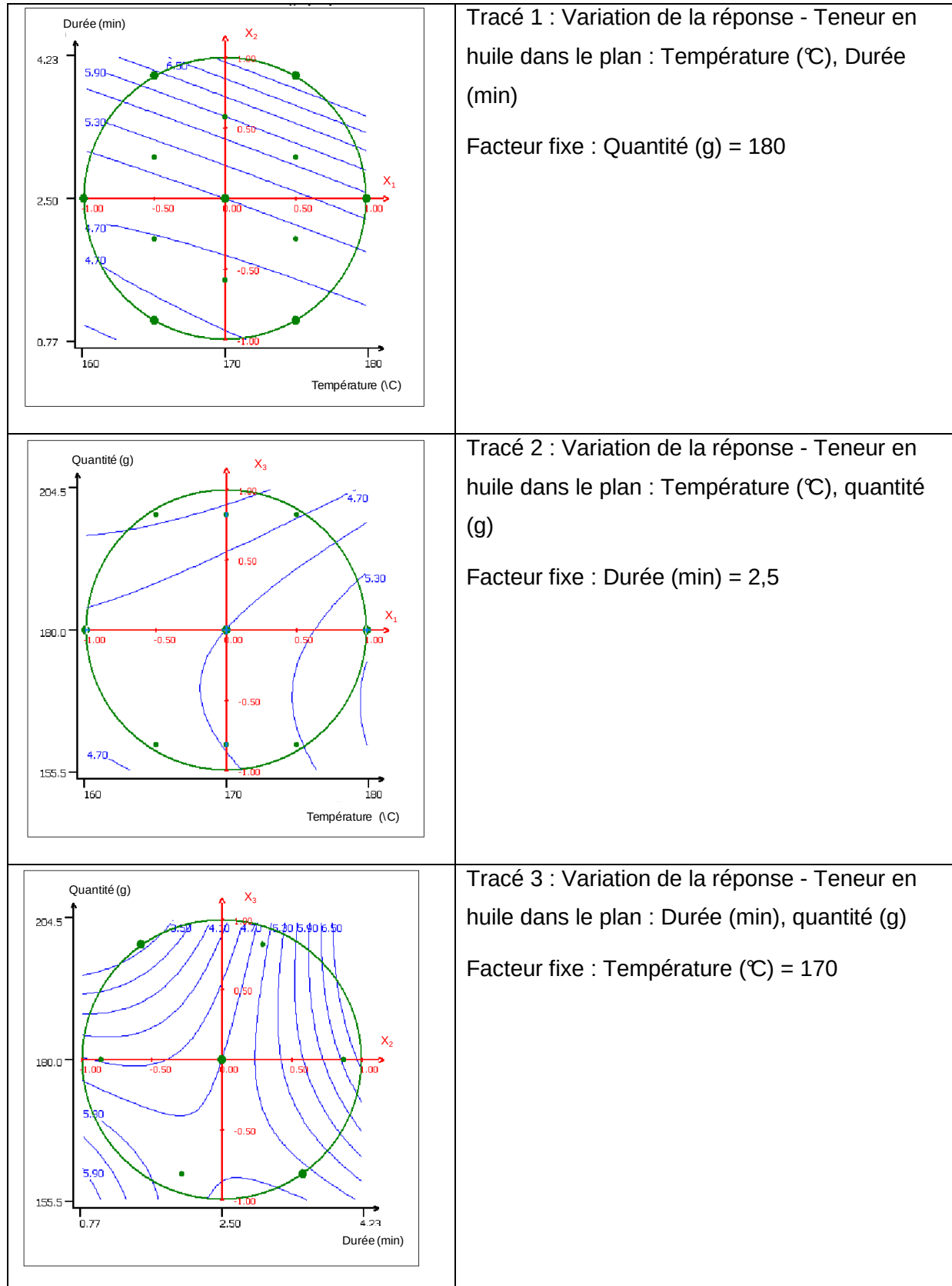


Figure 5-12 : Courbes d'isorréponses de la teneur en huile de la banane plantain frite (Y_2) dans le cas de l'huile de soja

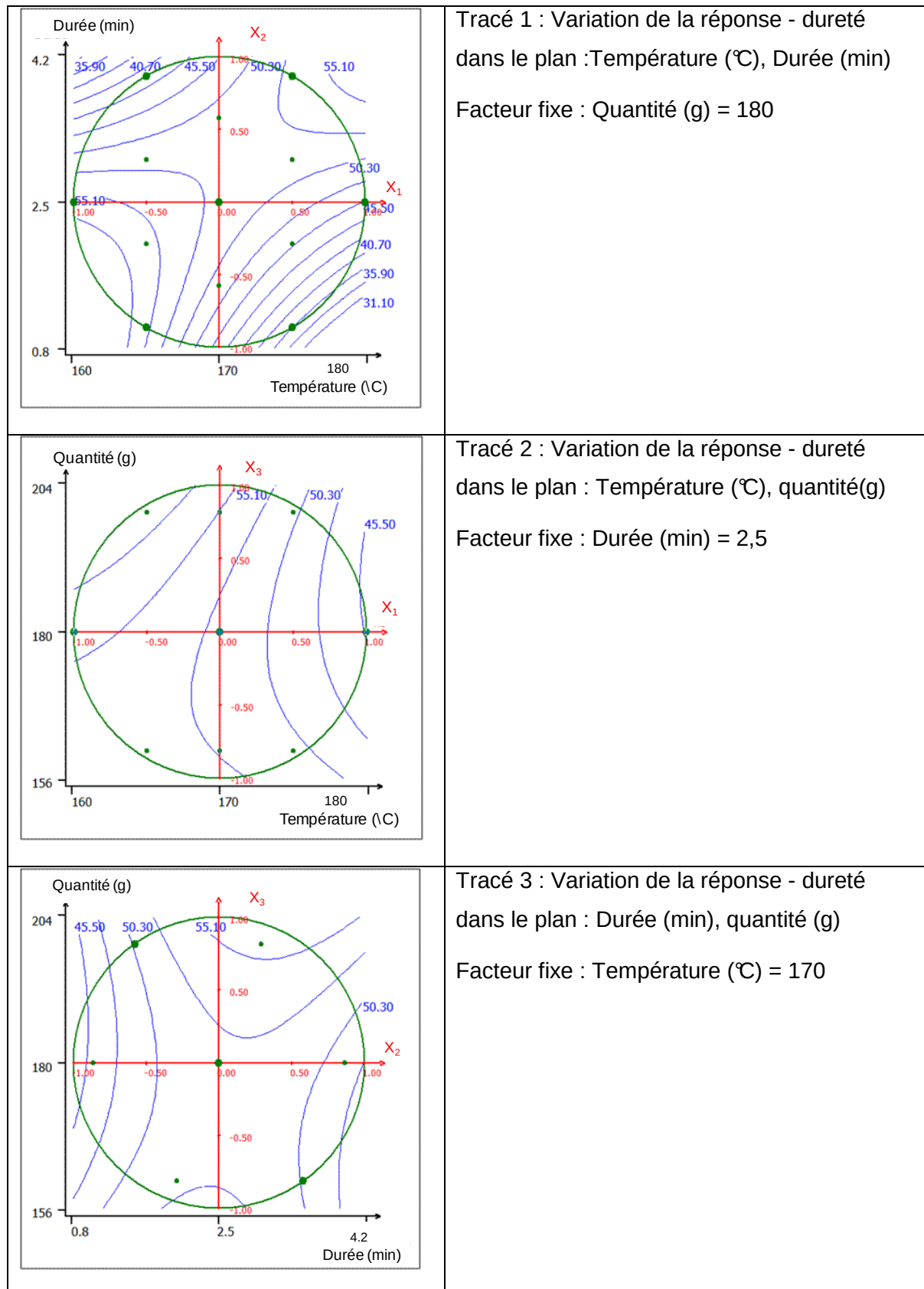


Figure 5-13 : Courbes d'isoréponses de la dureté du plantain frit (Y_3) dans le cas de l'huile de soja

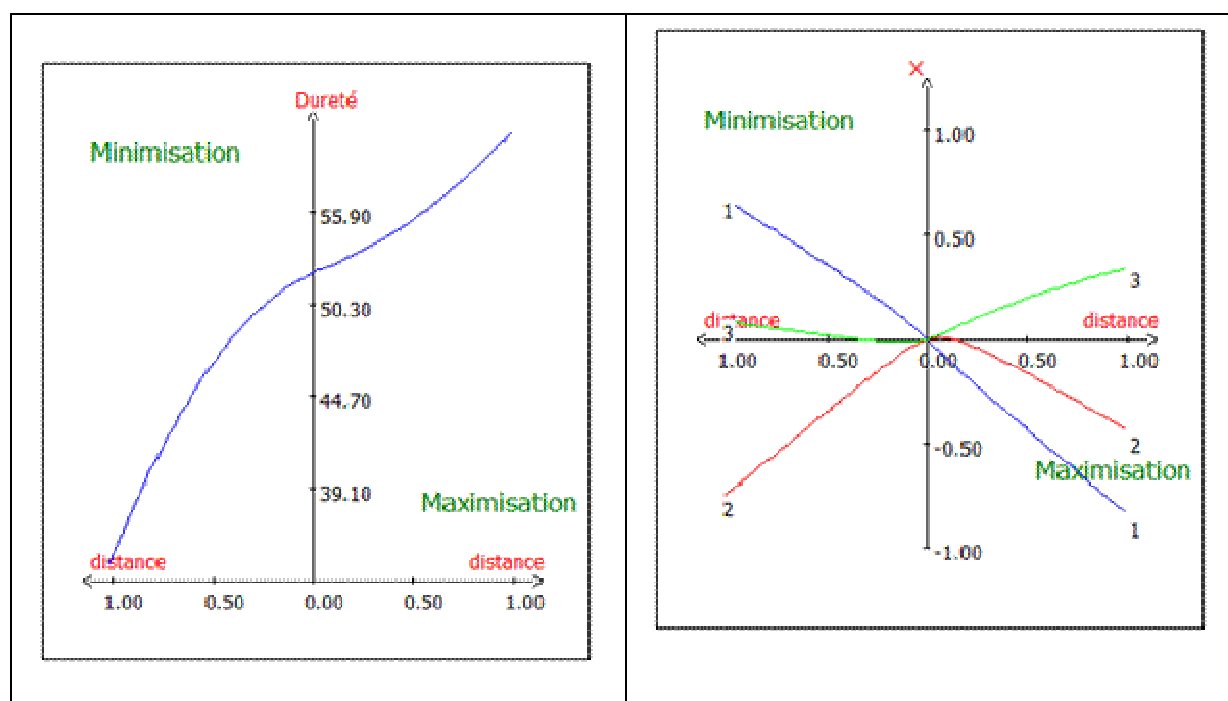


Figure 5-14 : Chemin optimal pour la réponse dureté de la banane plantain après friture avec l'huile de soja

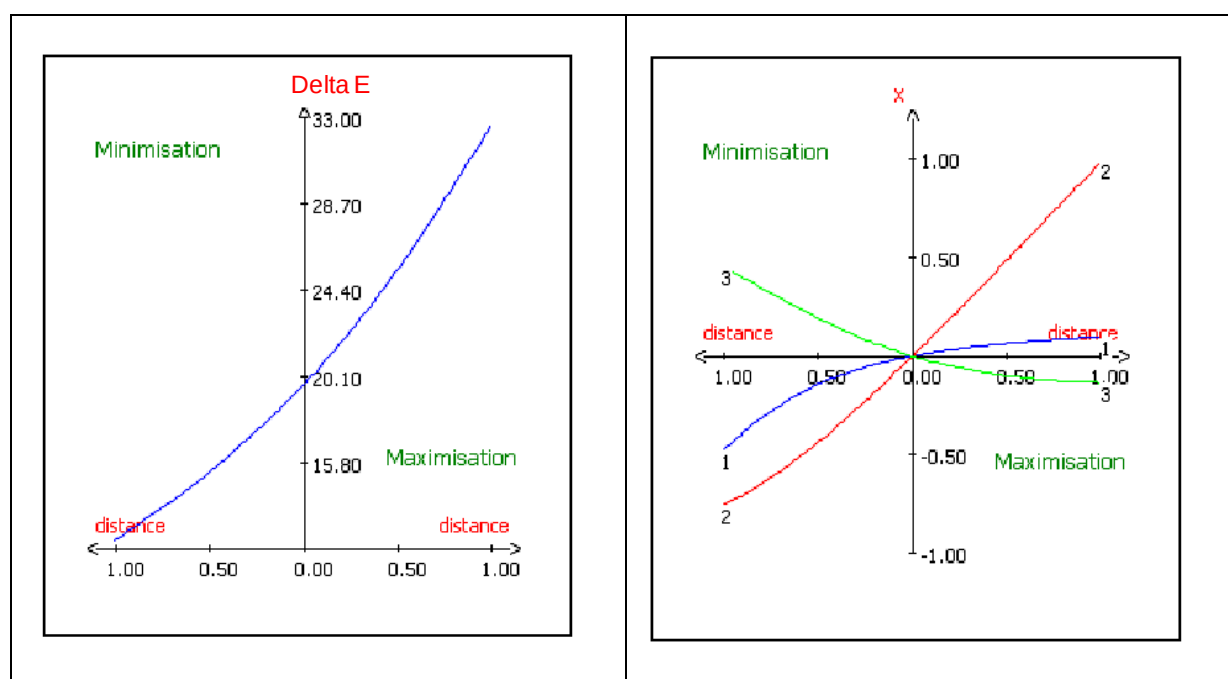


Figure 5-15 : Chemin optimal pour la réponse couleur de la banane plantain après friture avec l'huile de soja.

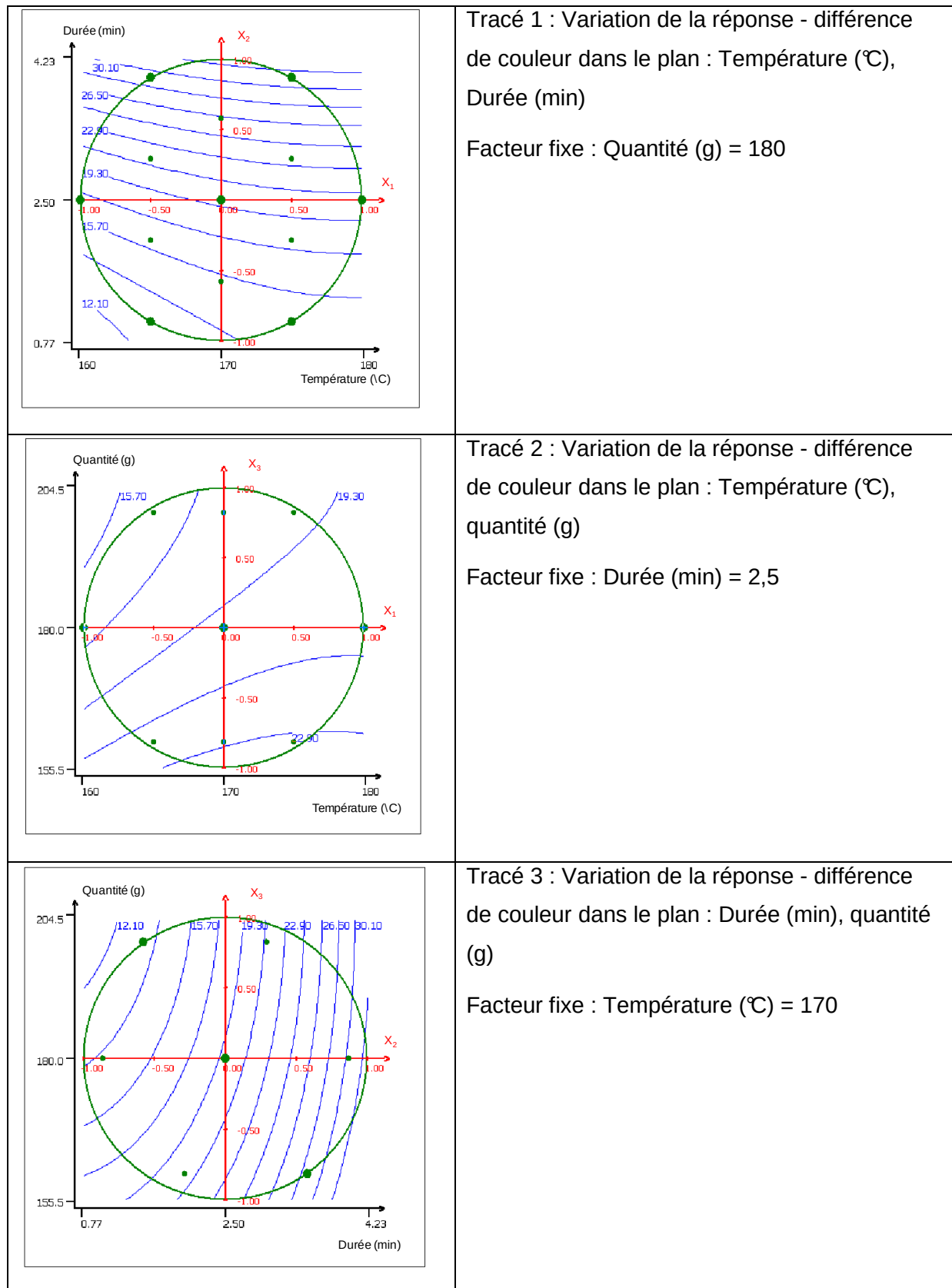


Figure 5-16 : Courbes d'isorréponses de la couleur (ΔE) de la banane plantain frite (Y_4) dans le cas de l'huile de soja.

5.4 MESURE DE VIEILLISSEMENT DES HUILES AU COURS DE LA FRITURE PROFONDE DE LA BANANE PLANTAIN

5.4.1 Evolution du profil d'acides gras des différentes huiles végétales en fonction de la durée du procédé de friture profonde

Les **tableaux 5-10** et **5-11** ci-dessous montrent l'évolution du profil en acides gras des trois huiles utilisées pour notre étude au cours du procédé de friture. Les principaux AG, ayant un pourcentage représentatif, sont uniquement présentés dans les tableaux.

Les huiles Frial, de soja et de palme raffinée oléine montrent un changement de leur composition en acides gras au cours de la friture. Pour ces trois huiles, les acides palmitique et stéarique (voir l'ensemble des AGS) augmentent. On note une augmentation plus considérable du C16:0 chez l'HPRO ($41,28 \pm 0,09\%$ à $43,635 \pm 0,25\%$) par rapport aux deux autres valeurs pour les huiles frial et de soja qui varient de $4,26 \pm 0,01\%$, $10,50 \pm 0,07\%$ à $4,71 \pm 0,00\%$ et $11,34 \pm 0,01\%$ respectivement. L'AGMI représenté dans les tableaux par l'acide oléique a également varié au cours du procédé de friture. Dans ce cas, on assiste à des changements fluctuants. On observe une diminution du pourcentage des acides linoléique et linolénique et de l'ensemble des AGPI dans les trois cas. Le C18:2 n-6 a baissé de $16,53 \pm 0,1\%$ à $15,63 \pm 0,17\%$ pour l'huile Frial, de $53,82 \pm 0,11\%$ à $52,48 \pm 0,07\%$ pour l'huile de soja et de $10,80 \pm 0,13\%$ à $7,63 \pm 0,10\%$ pour l'HPRO. Les résultats indiquent une faible variation du C18:2 n-6 pour le cas du soja mais une très forte variation chez l'HPRO. La diminution du C18:3 n-3 est plus remarquable chez les huiles de soja comparé aux huiles Frial et de palme raffinée oléine avec des proportions qui varient de $6,03 \pm 0,04\%$ à $5,22 \pm 0,02\%$; $4,83 \pm 0,44\%$ à $4,53 \pm 0,87\%$ et de $0,17 \pm 0,00\%$ à $0,11 \pm 0,03\%$ respectivement. Cette diminution d'AGI occasionne une augmentation d'AGS au cours de la friture. Pendant la friture, l'HPRO laisse apparaître une augmentation dans sa composition les AGS à compté du 9^{ème} Kg de plantain frit (troisième jour) où ils varient de $0,03 \pm 0,02\%$ à $0,11 \pm 0,02\%$ (données non représentées).

Tableau 5-10 : Variation des acides gras de l'huile Frial et de soja au cours de 10 jours de friture consécutifs

Type d'huile	Quantité de plantain	C16:0 (%)	C18:0 (%)	C18:1n9c (%)	C18:2 n-6c (%)	C18:3 n-3 (%)	C18:2/C16:0 (%)	C18:3/C16:0 (%)
Frial	0	4,26±0,01 ^a	1,25±0,00 ^a	72,97±0,53 ^{ab}	16,53±0,1 ^c	4,83±0,44 ^a	3,88±0,02 ^e	1,13±0,10 ^a
	3	4,28±0,01 ^a	2,31±0,10 ^b	73,09±0,70 ^{ab}	15,95±0,25 ^b	4,08±0,00 ^a	3,73±0,06 ^d	0,95±0,00 ^a
	9	4,41±0,05 ^b	2,35±0,18 ^b	71,39±0,31 ^a	15,79±0,17 ^{ab}	4,53±0,87 ^a	3,58±0,01 ^c	1,07±0,19 ^a
	15	4,44±0,00 ^b	2,48±0,01 ^b	71,15±0,03 ^a	15,54±0,00 ^a	5,02±0,02 ^a	3,50±0,00 ^{bc}	1,13±0,00 ^a
	21	4,55±0,00 ^c	2,39±0,06 ^b	70,93±0,70 ^a	15,67±0,00 ^{ab}	5,19±0,03 ^a	3,43±0,05 ^b	1,14±0,01 ^a
	27	4,71±0,00 ^d	2,28±0,48 ^b	71,81±0,31 ^{ab}	15,63±0,17 ^{ab}	4,53±0,87 ^a	3,32±0,03 ^{7a}	0,96±0,19 ^a
Soja	0	10,50±0,07 ^a	2,93±0,06 ^{cd}	25,53±0,09 ^b	53,82±0,11 ^{ef}	6,03±0,04 ^{de}	5,13±0,02 ^h	0,57±0,004 ^f
	3	10,79±0,07 ^b	2,88±0,01 ^{ab}	25,69±0,06 ^b	54,08±0,22 ^f	5,74±0,18 ^c	5,01±0,02 ^g	0,53±0,020 ^d
	6	10,77±0,01 ^b	2,91±0,01 ^{bc}	25,68±0,05 ^b	53,38±0,10 ^{bcde}	5,93±0,04 ^d	4,96±0,01 ^f	0,55±0,003 ^e
	9	11,20±0,08 ^d	2,85±0,02 ^a	24,92±0,12 ^a	53,70±0,38 ^{def}	6,10±0,14 ^e	4,80±0,00 ^d	0,55±0,015 ^{de}
	12	11,03±0,01 ^c	2,96±0,01 ^{d^e}	26,23±0,03 ^c	53,22±0,07 ^{bcd}	5,55±0,08 ^b	4,82±0,00 ^e	0,50±0,008 ^c
	15	11,13±0,02 ^{cd}	2,99±0,01 ^{e^f}	26,44±0,04 ^{cd}	52,97±0,13 ^{abc}	5,44±0,05 ^b	4,76±0,02 ^c	0,49±0,005 ^{bc}
	18	11,21±0,04 ^d	3,00±0,01 ^f	26,40±0,03 ^{cd}	52,81±0,16 ^{ab}	5,46±0,05 ^b	4,71±0,01 ^b	0,49±0,006 ^b
	21	11,37±0,19 ^e	3,02±0,002 ^f	26,71±0,53 ^{de}	53,44±0,89 ^{cde}	5,42±0,08 ^b	4,70±0,00 ^b	0,48±0,001 ^b
	24	11,34±0,01 ^e	3,06±0,003 ^g	26,82±0,10 ^e	52,48±0,07 ^a	5,22±0,02 ^a	4,63±0,01 ^a	0,46±0,001 ^a

Moyennes de trois répétitions, Les moyennes suivies de la même lettre dans une colonne ne sont pas significativement différentes (p <0,05) suivant le test d'ANOVA de Fisher.

Tableau 5-11 : Variation des acides gras de l'HPRO après 10 jours de friture consécutifs

Quantité de plantain (Kg)	C16:0	C18:0	C18:1 n-9c	C18:2 n-6c	C18:3 n-3	C18:2/C16:0	C18:3/C16:0
0	41,28±0,09 ^b	3,60±0,02 ^a	42,45±0,14 ^{abc}	10,80±0,13 ^j	0,17±0,00 ^c	0,26±0,004 ^j	0,004±0,000 ^b
3	40,92±0,17 ^a	3,65±0,02 ^{ab}	43,19±0,06 ^d	10,26±0,07 ⁱ	0,15±0,02 ^{bc}	0,25±0,003 ⁱ	0,004±0,001 ^{ab}
6	41,60±0,07 ^{bc}	3,66±0,02 ^{ab}	43,11±0,08 ^d	9,67±0,01 ^h	0,13±0,00 ^{abc}	0,23±0,001 ^h	0,003±0,000 ^{ab}
9	41,67±0,14 ^c	3,72±0,06 ^b	43,07±0,14 ^d	9,38±0,06 ^g	0,14±0,03 ^{abc}	0,23±0,002 ^g	0,003±0,001 ^{ab}
12	42,07±0,20 ^d	3,69±0,05 ^b	43,08±0,25 ^d	9,14±0,09 ^f	0,13±0,03 ^{abc}	0,22±0,002 ^f	0,003±0,001 ^{ab}
15	42,32±0,1 ^d	3,71±0,07 ^b	42,97±0,16 ^d	8,89±0,11 ^e	0,13±0,03 ^{ab}	0,21±0,002 ^e	0,003±0,001 ^{ab}
18	42,81±0,22 ^e	3,85±0,06 ^{cd}	42,67±0,11 ^c	8,45±0,06 ^d	0,13±0,01 ^{abc}	0,20±0,002 ^d	0,003±0,000 ^{ab}
21	43,30±0,23 ^f	3,83±0,01 ^c	42,54±0,02 ^{bc}	8,06±0,08 ^c	0,11±0,01 ^{ab}	0,19±0,003 ^c	0,003±0,000 ^a
24	43,71±0,27 ^g	3,92±0,05 ^{de}	42,21±0,21 ^a	7,72±0,04 ^b	0,12±0,03 ^{ab}	0,18±0,002 ^b	0,003±0,001 ^a
27	43,74±0,23 ^g	3,97±0,04 ^{ef}	42,39±0,11 ^{ab}	7,51±0,08 ^a	0,10±0,02 ^a	0,17±0,002 ^a	0,002±0,000 ^a
30	43,64±0,25 ^g	4,03±0,03 ^f	42,27±0,16 ^a	7,63±0,10 ^{ab}	0,11±0,03 ^{ab}	0,18±0,003 ^{ab}	0,003±0,001 ^a

Moyennes de trois répétitions, Les moyennes suivies de la même lettre dans une colonne ne sont pas significativement différentes (p <0,05) suivant le test d'ANOVA de Fisher.

Le rapport entre l'acide linoléique et l'acide palmitique (C18:2 / C16:0) est considéré comme un indicateur pour évaluer le niveau de dégradation de l'huile (Bansal *et al.*, 2010). Dans les trois cas, on assiste à une diminution au cours de la friture et le ratio présente de bonnes corrélations avec le temps de friture. Ce rapport pour l'huile Frial varie de $3,88 \pm 0,02\%$ à $3,32 \pm 0,037\%$, une diminution faible, de $5,13 \pm 0,02\%$ à $4,63 \pm 0,01\%$ pour l'huile de soja et enfin de $0,26 \pm 0,00\%$ à $0,18 \pm 0,00\%$ pour l'HPRO.

Tous ces changements de la composition en AG dans les huiles ont lieu suite aux réactions chimiques qui se produisent au sein même des huiles pendant le traitement thermique. Il s'agit donc des réactions de cyclisation, polymérisation, pyrolytique, d'hydrolyse, d'oxydation (Xu *et al.*, 1999).

5.4.2 Evolution de la teneur en composés polaires

La détermination des composés polaires dans les huiles ayant subies la friture afin de vérifier leur qualité est aujourd'hui employée un peu partout dans les restaurants et fast food. C'est une méthode objective (Koh *et al.*, 2011) qui est utilisée en raison de sa précision et reproductibilité (Abdulkarim *et al.*, 2007 ; Naghshineh *et al.*, 2009). Elle est même considérée par de nombreux auteurs (Fritsch, 1981 ; Blumenthal, 1991 ; Xu *et al.*, 1999 ; Tan et Man, 1999 ; Abdulkarim *et al.*, 2007 ; Romano *et al.*, 2012) comme étant une mesure fiable pour connaître l'état de dégradation de l'huile avec une limite seuil en taux de composés polaires de 25% régit par la législation européenne (Koh *et al.*, 2011).

Les résultats expérimentaux sur les mesures des composés polaires totaux sont présentés dans le **tableau 5-12** qui montre une augmentation remarquable durant la période de friture des ces composés pour les trois huiles. Les composés polaires augmentent progressivement de $2,9 \pm 0,9\%$ à $17,8 \pm 0,8\%$ dans l'huile Frial ; de $9,4 \pm 0,0\%$ à $12,6 \pm 0,0\%$; de $4,5 \pm 0,0\%$ à $15,5 \pm 0,9\%$ respectivement par les méthodes électronique (capteur Ebro) et par la méthode officielle utilisant une élution sur colonne de silice. Les composés polaires dans les huiles de soja et de palme oléine étaient suffisamment élevés quelque soit la méthode utilisée, avec des valeurs maximales de $26,2 \pm 2,0\%$ (Ebro), $26,7 \pm 0,0\%$ (PCT 120) et $28,9 \pm 1,5\%$ (officielle) pour l'huile de soja. Pour l'huile de palme oléine, les valeurs sont encore plus élevées que précédemment avec des valeurs maximales de $32,1 \pm 2,4\%$ (Ebro), $28,3 \pm 0,0\%$ (PCT 120) et $29,7 \pm 0,8\%$ (officielle). Ces valeurs élevées peuvent s'expliquer par le fait que l'huile initiale contenait déjà un taux élevé en CPT avant utilisation de l'huile par rapport à celles rencontrée dans la littérature (Tan et Man, 1999 ; Abdulkarim *et al.*, 2007).

Tableau 5-12 : Teneurs en composés polaires totaux mesurées par trois méthodes et mesure de la viscosité après friture de la banane plantain.

Type d'huile	Quantité de plantain (Kg)	Composés polaires capteur Ebro (%)	Composés polaires PCT120 (%)	Composés polaires colonne de silice (%)	Viscosité (mPa.s)
Frial	0	2,9±0,96 ^a	9,43±0,00 ^a	4,49±0,00 ^a	51,80±0,01 ^a
	3	6,3±1,52 ^b	9,43±0,00 ^b	8,43±0,12 ^b	54,70±0,00 ^{ab}
	6	9,9±2,04 ^c	11,79±0,00 ^d	9,08±0,68 ^{bc}	55,5±0,00 ^{ab}
	9	11,7±1,30 ^{cd}	11,79±0,00 ^d	9,25±0,57 ^{bc}	56,80±0,00 ^{abc}
	12	13,3±1,35 ^{de}	11,00±0,00 ^c	9,51±0,12 ^c	59,30±0,00 ^{bcd}
	15	14,1±2,13 ^{def}	11,00±0,00 ^c	11,75±0,58 ^d	61,30±0,00 ^{cde}
	18	16,2±1,99 ^{fgh}	12,57±0,00 ^e	12,75±0,04 ^e	62,80±0,00 ^{de}
	21	15±3,22 ^{efg}	12,57±0,00 ^e	13,39±0,84 ^{ef}	62,70±0,00 ^{de}
	24	16,4±2,16 ^{fgh}	13,36±0,00 ^f	13,79±0,83 ^f	63,20±0,01 ^{de}
	27	17,1±2,16 ^{gh}	14,14±0,00 ^g	14,01±0,58 ^f	65,50±0,00 ^e
	30	17,8±0,84 ^h	12,57±0,00 ^e	15,51±0,93 ^g	70,80±0,01 ^f
Soja	0	7,50±0,50 ^a	12,57±0,00 ^a	5,15±1,97 ^a	55,69±1,90 ^a
	3	11,33±1,26 ^b	13,36±0,00 ^b	6,79±2,23 ^a	58,61±2,39 ^{ab}
	6	12,83±1,04 ^b	15,71±0,00 ^c	7,47±3,01 ^{ab}	62,51±2,44 ^b
	9	13,17±1,53 ^b	17,29±0,00 ^d	10,75±2,09 ^b	67,89±2,56 ^c
	12	20,00±2,00 ^c	18,86±0,00 ^e	14,88±2,07 ^c	70,02±1,96 ^c
	15	20,00±2,00 ^c	22,00±0,00 ^f	19,17±1,59 ^d	71,92±0,95 ^c
	18	21,67±1,53 ^{cd}	22,79±0,00 ^g	21,76±0,43 ^d	77,09±4,13 ^d
	21	23,50±2,00 ^{de}	24,36±0,00 ^h	23,43±1,97 ^d	80,54±2,25 ^{de}
	24	26,17±2,02 ^e	26,71±0,00 ⁱ	28,94±1,50 ^e	82,04±1,38 ^e
HPRO	0	11,37±0,23 ^a	13,75±0,56 ^a	10,42±1,40 ^a	72,81±2,49 ^a
	3	13,23±0,32 ^a	19,25±0,56 ^b	12,96±2,12 ^a	72,01±1,38 ^a
	6	18,37±0,81 ^b	21,21±1,11 ^{cd}	16,63±1,15 ^b	76,37±0,92 ^b
	9	18,70±0,52 ^b	20,43±0,00 ^c	18,38±1,77 ^b	75,96±1,72 ^b
	12	21,00±1,32 ^b	21,61±0,56 ^d	23,80±1,24 ^c	82,86±2,34 ^c
	15	21,70±2,31 ^b	22,00±0,00 ^d	24,93±1,10 ^{cd}	83,88±1,39 ^c
	18	26,83±4,16 ^c	24,75±0,56 ^d	25,07±2,73 ^{cd}	81,97±1,29 ^c
	21	28,17±3,22 ^c	26,32±0,56 ^e	23,43±2,48 ^{cde}	88,66±0,46 ^d
	24	29,57±1,86 ^{cd}	26,71±0,00 ^e	27,06±0,62 ^{def}	93,81±0,91 ^e
	27	32,57±1,50 ^d	27,89±0,56 ^f	28,66±0,29 ^{ef}	92,90±0,55 ^e
	30	32,07±2,38 ^d	28,29±0,00 ^f	29,74±0,76 ^f	92,20±1,00 ^e

Moyennes de trois répétitions, Les moyennes suivies de la même lettre dans une colonne ne sont pas significativement différentes (p <0,05) suivant le test d'ANOVA de Fisher.

Au bout de 24 Kg correspondant à 8 jours de friture et de 18Kg de banane plantain (6 jours de friture), les huiles de friture ont atteint la limite seuil en composés polaires respectivement pour l'huile de soja et pour l'huile de palme oléine.

En outre, des courbes de corrélations entre le % CPT obtenus par la méthode officielle et par le capteur Ebro ont été représentées comme indiqué dans les travaux de Osawa *et al.*, (2012). Les courbes ont révélé des corrélations linéaires positives avec des coefficients de corrélations $\geq 0,94$ qui explique plus 90% de la variabilité des résultats. Ces résultats corroborent ceux de Sánchez-Gimeno *et al.*, (2008) ainsi que l'étude réalisée par Osawa *et al.*, (2012).

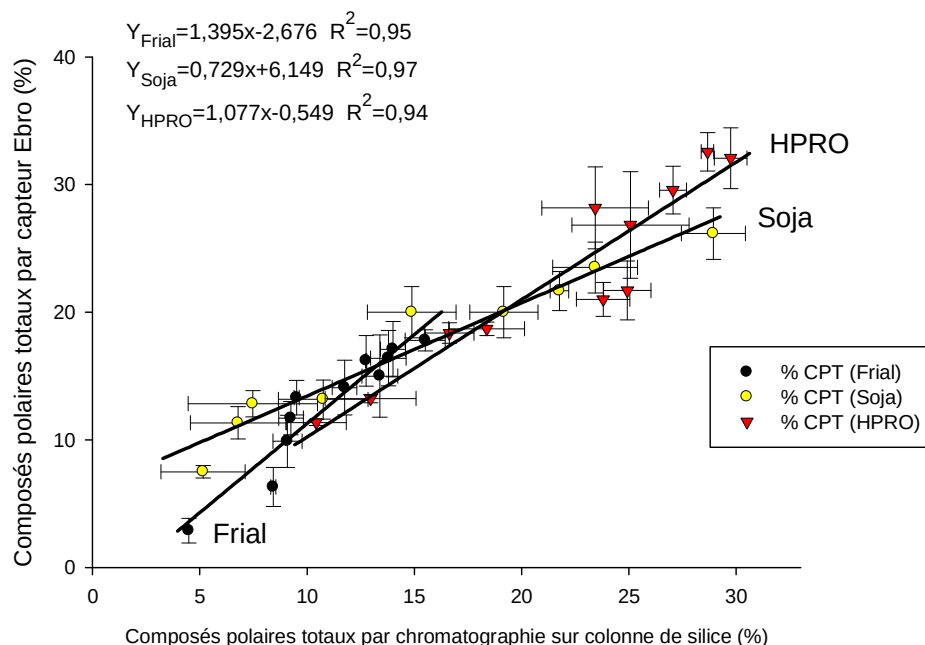


Figure 5-17 : Corrélations entre les CPT mesurés par capteur Ebro et méthode chromatographique pour les différentes huiles (Frial, soja et d'huile de palme raffinée oléine HPRO).

5.4.3 Evolution de la viscosité dynamique

Le comportement rhéologique des huiles au cours de la friture de bananes plantains pendant plusieurs jours a été étudié. Les huiles se comportent comme un fluide newtonien (Kalogianni *et al.*, 2011) et les résultats finaux obtenus, dépendent de la nature des huiles végétales (c'est-à-dire de leur structure et de la composition en triacylgcérols). De

nombreux auteurs (Besbes *et al.*, 2005) ont souligné dans leurs études une corrélation entre la longueur de chaîne des acides gras et la viscosité de l'huile.

Rappelons aussi que certains auteurs (Abdulkarim *et al.*, 2007 ; Naghshineh *et al.*, 2009) considèrent la viscosité comme étant un des paramètres physiques permettant d'évaluer le degré de dégradation de l'huile de friture au niveau industriel ou domestique. D'autres auteurs avancent que c'est un paramètre qui permet d'estimer la quantité d'huile absorbée par le produit frit (Paul *et al.*, 1997 ; Ravi *et al.*, 2005 ; Bhattacharya *et al.*, 2008) car il influence l'absorption d'huile dans le cas de fritures répétées (Guillaumin, 1988; Moreira *et al.*, 1997 ; Kalogianni *et al.*, 2011).

La viscosité en fonction du temps de friture pour les trois huiles est représentée dans le **tableau 5-12** et la **figure 5-18**. Elle augmente pour les trois huiles avec la durée de friture. Cette augmentation est due à la production et l'accumulation de produits de dégradation qui sont des polymères à haut poids moléculaires (Stevenson *et al.*, 1984 ; Abdulkarim *et al.*, 2007 ; Sánchez-Gimeno *et al.*, 2008 ; Naghshineh *et al.*, 2009 ; Koh *et al.*, 2011). D'autres auteurs (Koh *et al.*, 2011) pensent que la viscosité peut être utilisée comme méthode alternative pour évaluer les composés à haut poids moléculaire sans faire appel aux méthodes chimiques. La viscosité la plus élevée est celle obtenue pour l'HPRO car elle aurait probablement subi plus de détériorations, suivie de l'huile de soja et enfin de l'huile Frial (voir le **tableau 5-2**).

Pour l'HPRO, la viscosité varie de $72,81 \pm 2,49$ mPas à $92,20 \pm 1,00$ mPas (de 0 à 10 jours de friture) et présente une équation de corrélation négative avec la durée de friture et un coefficient de corrélation de $R^2=0,97$. La viscosité de l'huile de soja varie également de $55,69 \pm 1,90$ mPas à $82,04 \pm 1,38$ mPas (de 0 à 8 jours de friture) avec un coefficient de corrélation positive $R^2=0,99$, tandis que la viscosité de l'huile Frial varie beaucoup moins par rapport aux deux autres. Elle augmente cependant de $51,80 \pm 0,01$ mPas à $70,80 \pm 0,01$ mPas avec un coefficient de corrélation positive de $R^2=0,97$.

Des corrélations ont été réalisées entre la viscosité et les CPT obtenus avec les méthodes officielle et par capteur Ebro en accord avec les travaux de Sánchez-Gimeno *et al.*, 2008. Pour toutes les huiles, de fortes corrélations positives sont obtenues au cours de la friture avec des coefficients de corrélation de 0,92 ; 0,97 ; 0,95 par la méthode de capteur Ebro et de 0,95 ; 0,97 et 0,92 par la méthode officielle respectivement pour l'huile Frial, l'huile de soja et l'HPRO, respectivement.

Les corrélations établies montrent les changements de viscosité en raison d'une altération des composés durant le procédé de friture profonde (Abdulkarim *et al.*, 2007 ; Besbes *et al.*, 2005 ; Sánchez-Gimeno *et al.*, (2008).

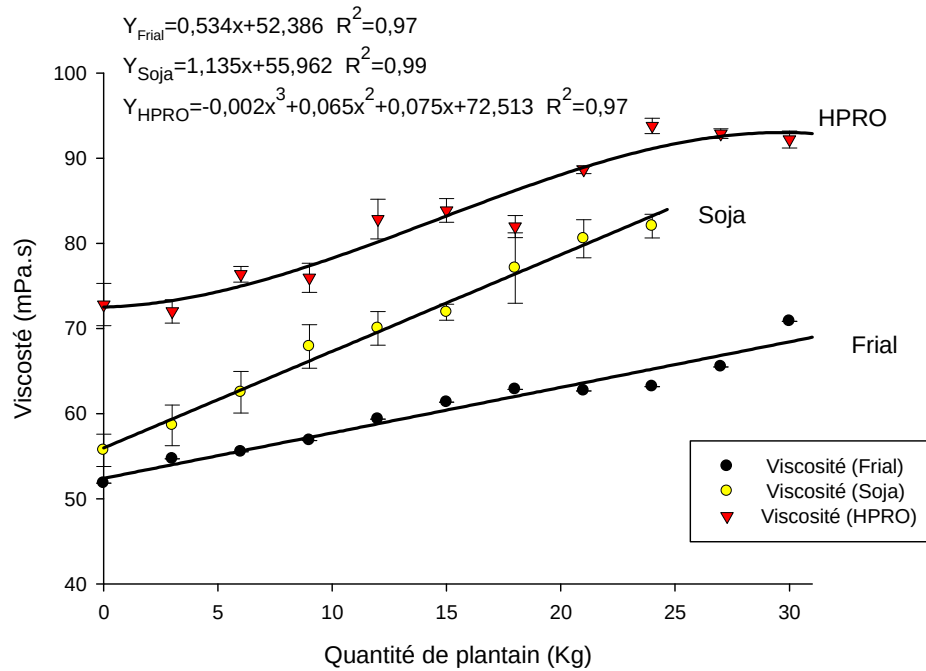


Figure 5-18 : Evolution de la viscosité (en mPa.s) mesurée à 25°C en fonction de la quantité de banane plantain frit dans les différentes huiles (Frial, soja et d'huile de palme raffinée oléine HPRO).

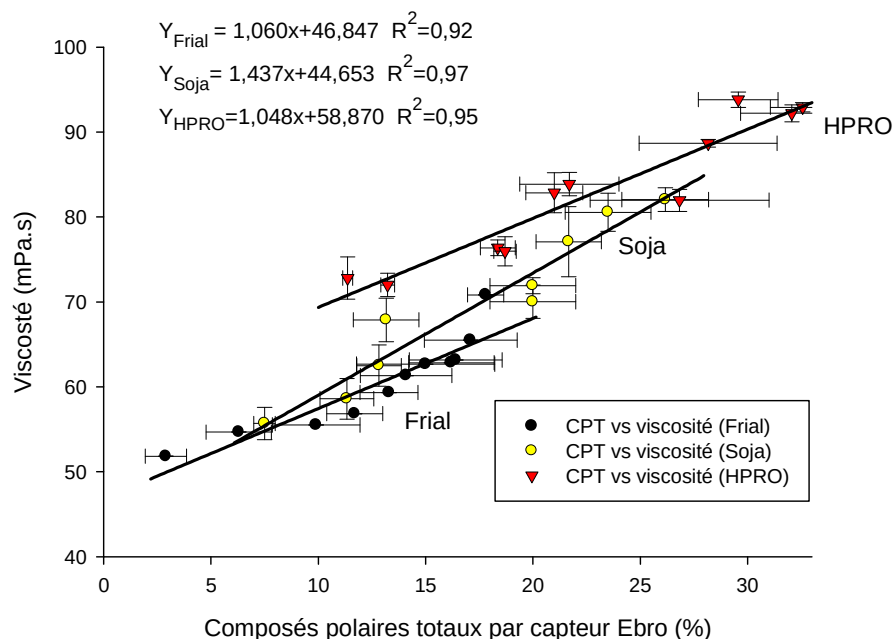


Figure 5-19 : Corrélations entre les CPT mesurés par capteur électronique en fonction de la viscosité des différentes huiles (Frial, soja et d'huile de palme raffinée oléine HPRO).

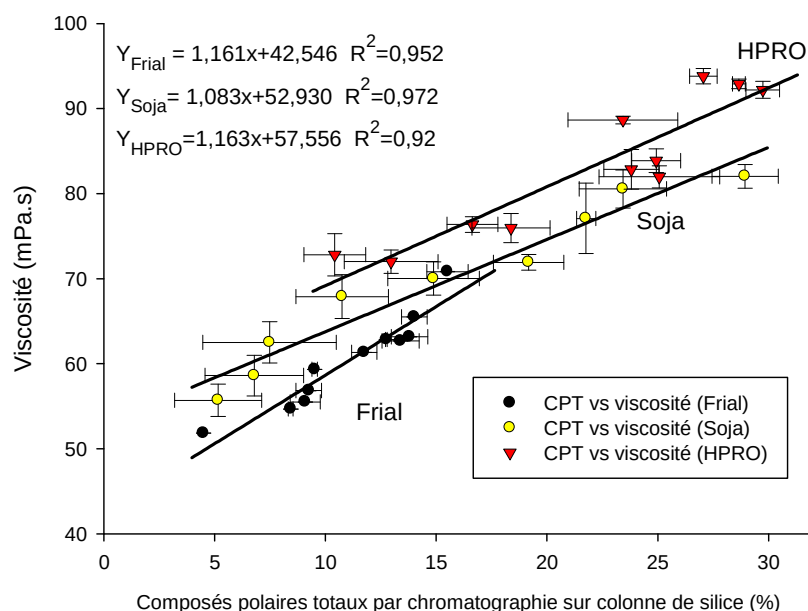


Figure 5-20 : Corrélations entre les CPT mesurés par méthode chromatographique en fonction de la viscosité des différentes huiles (Frial, soja et d'huile de palme raffinée oléine HPRO).

5.4.4 Evolution des indices chimiques en fonction du vieillissement des huiles de friture

L'étude portant sur la stabilité des huiles de friture au cours du temps par des indices chimiques est présentée dans le **tableau 5-13**.

La valeur Totox

La valeur Totox est un paramètre qui, à partir des mesures des indices de peroxyde et de para-anisidine permet d'évaluer la qualité de l'huile. Le tableau 5-13 présente les résultats de cette analyse obtenue par calcul. La valeur Totox des trois échantillons d'huile a augmentée graduellement au cours des premiers jours de friture pour ensuite chuter à la fin du procédé. L'huile de soja a subi une oxydation car elle présente une plus forte valeur totox maximale ($103,69 \pm 0,46$) après quatre jours de friture. Cette valeur élevée peut s'expliquer par le fait que l'huile de soja est riche en AGPI susceptibles de s'oxyder. Après cinq jours de friture la valeur Totox de l'huile de palme raffinée oléine a montré son maximum ($93,39 \pm 0,25$). La valeur Totox de l'huile Frial a atteint son maximum après six jours de friture ($79,49 \pm 0,47$). Cette dernière est moins sensible à l'oxydation que les deux autres malgré sa haute teneur en AGPI. On observe une diminution des valeurs Totox de toutes les huiles en fin de process. Cette chute peut être due à la diminution des peroxydes après avoir atteint leur maximum pendant la friture pour les trois huiles.

Indice de peroxyde

L'indice de peroxyde est un paramètre qui indique l'oxydation primaire de l'huile par production des composés appelés hydroperoxydes. Selon Choe et Min, (2006) ; Kim *et al.*, (2013), ces composés se formeraient au niveau des positions 8, 9, 10 de la chaîne carbonée de l'acide oléique, des positions 11, 9 et 13 de la chaîne carbonée de l'acide linoléique, et enfin des positions 9, 12, 13 et 16 de la chaîne carbonée de l'acide linoléique. Ces hydroperoxydes sont aussi connus pour ne pas être stables et se dégradent pour donner d'autres produits d'oxydation secondaires. Cet indice est considéré comme un bon indicateur pour l'oxydation primaire de l'huile (Frankel, 2005 ; Romano *et al.*, 2012).

Nous avons remarqué que pour chaque huile, l'IP augmente pendant les premiers jours de friture jusqu'à atteindre le maximum avant de décroître à la fin de la durée de friture. Ce

phénomène de montée et de descente des valeurs de cet indice est rencontré dans beaucoup d'études sur la friture. Les huiles de soja et de palme montrent de très fortes augmentations de l'IP dès les deux 1^{er} jours de friture pour ensuite évoluer progressivement, tandis que l'huile Frial augmente progressivement tout au long de la friture, pour baisser en fin de friture.

Les valeurs maximales d'IP ont été atteintes après six jours ($7,63 \pm 0,09$ meqO₂/kg d'huile), quatre jours ($15,74 \pm 0,33$ meqO₂/kg d'huile) et cinq jours ($12,523 \pm 0,013$ meqO₂/kg d'huile) de friture respectivement pour l'huile Frial, l'huile de soja et l'HPRO. L'augmentation spectaculaire de l'IP pour l'huile de soja est certainement due à sa concentration élevée en C18:3 n-3 (Abdulkarim *et al.*, 2007). L'oxydation primaire est continue malgré la chute des valeurs de l'IP. Nous nous sommes donc intéressés à mesurer les composés secondaires qui se forment et qui s'accumulent dans l'huile par décomposition des hydroperoxydes.

Indice d'iode

L'indice d'iode permet de connaître le nombre d'insaturations que peut avoir une huile ou une graisse. Le **tableau 5-13** présente la variation de l'indice d'iode au cours de la préparation de la banane plantain pendant 8 et 10 jours consécutifs. L'huile Frial présente une plus grande valeur en indice d'iode de $226,00 \pm 0,97$ g of I₂/100g d'huile car c'est la plus riche en AGI, suivi de l'huile de soja ($132,41 \pm 1,86$ g of I₂/100g d'huile) et enfin de l'HPRO ($55,10 \pm 0,20$ g of I₂/100g d'huile). Pendant l'opération de friture, cet indice n'a pas cessé de baisser jusqu'à $138,23 \pm 0,58$ g of I₂/100g d'huile (frial), $103,98 \pm 1,21$ g of I₂/100g d'huile (soja), $44,48 \pm 0,14$ g of I₂/100g d'huile (HPRO). Ces résultats montrent que nos huiles ont subi une altération et que la baisse de l'indice d'iode serait la conséquence de la destruction des doubles liaisons par oxydation et polymérisation (Abdulkarim *et al.*, 2007) ou de la modification des acides gras durant la friture (Tynek *et al.*, 2001 ; Manral *et al.*, 2008).

Indice de para anisidine

L'étude de la stabilité de l'huile par l'indice de peroxyde n'étant pas suffisant pour évaluer la qualité de l'huile, nous permet de la compléter par une autre analyse qu'est l'indice de para-anisidine. Il permet de mesurer les composés carbonylés ou la teneur aldéhydes provenant de la décomposition des hydroperoxydes. Ils sont plus stables que les peroxydes d'où l'intérêt de faire l'analyse. Selon Zhang *et al.* (2013), les aldéhydes formés peuvent avoir une influence négative sur notre santé en occasionnant des cancers, promouvoir la pression

artérielle et endommager l'absorption des lipides liposolubles. Ils sont aussi responsables du développement du rancissement de l'huile.

Le **tableau 5-13** présente les résultats obtenus sur l'indice de para-anisidine et montre une augmentation des valeurs dans toutes les huiles. Dès le 1^{er} jour de friture, on constate une augmentation spectaculaire de l'IPa de $0,95 \pm 0,08$ - $25,15 \pm 1,69$ pour l'huile Frial, de $1,37 \pm 0,54$ - $37,49 \pm 0,02$ pour l'huile de soja et de $1,27 \pm 0,59$ - $58,74 \pm 2,24$ pour l'HPRO. Cet indice augmente jusqu'au dernier jour de friture où il a atteint des valeurs de $68,01 \pm 0,83$; $77,55 \pm 0,39$ et de $70,60 \pm 0,08$ respectivement pour les huiles Frial, de soja et de palme raffinée oléine. Les résultats indiquent que l'huile de soja subit une oxydation plus importante que les deux autres milieux de friture.

Indice d'acide

L'indice d'acide ou le pourcentage en acide gras libres est considérés par beaucoup d'auteurs (Stevenson *et al.*, 1984 ; Xu *et al.*, 1999 ; Bhattacharya *et al.*, 2008 ; Enriquez-Fernandez *et al.*, 2011) comme un paramètre indiquant la détérioration hydrolytique d'une matière grasse. De nombreuses études utilisent cet indice qui augmente au cours du temps. Les résultats obtenus sont présentés dans le **tableau 5-13** où on peut observer une évolution croissante au cours du temps. Initialement, les huiles avaient un indice d'acide (% acide oléique) de $0,22 \pm 0,00$; $0,18 \pm 0,02$ et $0,24 \pm 0,08$ respectivement pour l'huile Frial, l'huile de soja et l'HPRO. Après plusieurs jours de friture, l'acidité de toutes les huiles augmente en raison de l'hydrolyse des triacylglycérols et/ou du clivage des doubles liaisons d'AG. Les valeurs atteintes au dernier jour de friture (% ac. Oléique) sont de $0,78 \pm 0,05$ % (Frial), $1,48 \pm 0,28$ (soja) et $2,083 \pm 0,031$ (HPRO). Cette dernière présentait une teneur en AGL un peu plus élevée que les deux autres huiles. Nous remarquons également que nos résultats sont dans la gamme de la limite en AGL seuil fixé par certains pays (Firestone *et al.*, 1991 ; Juárez *et al.*, 2011) comme l'Australie, le Japon, la Belgique (qui fixe la limite à 2,5%), les Pays-Bas (à 4,5%), excepté le seuil fixé par les Etas-unis (1%).

Tableau 5-13 : Indices chimiques des huiles Frial, soja et palme raffinée oléine au cours de la friture profonde

Type d'huile	Quantité de plantain (Kg)	I.A (% ac. oléique)	IP (meqO ₂ /kg d'huile)	IPa	Valeur Totox	Indice d'iode (g of I ₂ /100g oil)
Frial	0	0,22±0,00 ^a	1,18±0,00 ^a	0,95±0,08 ^a	3,31±0,09 ^a	226,00±0,97 ⁱ
	3	0,28±0,00 ^{ab}	2,89±0,13 ^{bc}	25,15±1,69 ^b	30,92±1,95 ^b	203,18±1,44 ^h
	6	0,35±0,03 ^{bc}	3,77±0,54 ^{bcde}	41,40±1,14 ^c	48,94±2,22 ^c	189,15±0,68 ^g
	9	0,43±0,03 ^{cd}	4,27±0,44 ^{de}	50,20±0,17 ^d	58,74±0,71 ^d	188,46±0,74 ^g
	12	0,41±0,03 ^c	4,74±0,83 ^e	58,75±0,35 ^e	68,24±1,31 ^e	184,54±0,15 ^f
	15	0,52±0,06 ^d	6,07±0,97 ^f	59,53±7,87 ^e	71,68±9,82 ^e	159,74±0,68 ^e
	18	0,67±0,15 ^e	7,63±0,09 ^g	64,24±0,29 ^{ef}	79,49±0,47 ^f	151,93±0,13 ^d
	21	0,63±0,03 ^e	4,74±0,85 ^e	63,22±0,80 ^{ef}	72,70±2,51 ^{ef}	149,78±0,04 ^c
	24	0,63±0,04 ^e	3,97±0,27 ^{cde}	65,85±1,68 ^f	73,78±2,21 ^{ef}	149,78±0,04 ^b
	27	0,65±0,08 ^e	3,10±0,27 ^{bcd}	66,55±0,30 ^f	72,74±0,83 ^{ef}	139,23±0,65 ^a
	30	0,78±0,05 ^{cd}	2,59±0,56 ^b	68,01±0,83 ^f	73,19±0,30 ^{ef}	138,23±0,58 ^a
Soja	0	0,18±0,02 ^a	2,02±0,15 ^a	1,37±0,54 ^a	5,42±0,35 ^a	132,41±1,86 ^f
	3	0,26±0,03 ^a	10,62±0,90 ^{cd}	37,49±0,02 ^b	58,72±1,78 ^b	123,83±0,27 ^e
	6	0,37±0,11 ^a	16,07±0,60 ^f	58,19±0,26 ^c	90,32±1,38 ^c	121,12±0,75 ^d
	9	0,35±0,08 ^a	15,73±1,52 ^f	70,68±0,15 ^d	102,14±3,01 ^f	118,70±1,85 ^{cd}
	12	0,37±0,07 ^a	15,74±0,33 ^f	72,21±0,34 ^e	103,69±0,46 ^f	117,18±1,36 ^c
	15	0,71±0,08 ^b	11,29±0,18 ^{de}	71,34±0,20 ^f	93,91±0,51 ^d	113,07±2,38 ^b
	18	0,71±0,08 ^b	12,17±1,00 ^e	73,27±0,29 ^g	97,60±1,75 ^e	111,20±1,85 ^b
	21	1,02±0,35 ^b	9,52±0,27 ^{bc}	75,08±0,56 ^h	94,11±0,91 ^d	105,14±1,49 ^a
	24	1,48±0,28 ^c	9,27±0,11 ^b	77,55±0,39 ⁱ	96,08±0,56 ^{de}	103,98±1,21 ^a
HPRO	0	0,24±0,08 ^a	3,17±0,02 ^a	1,27±0,59 ^a	7,62±0,57 ^a	55,103±0,198 ^k
	3	0,60±0,07 ^b	8,59±0,01 ^b	58,74±2,24 ^b	75,92±2,25 ^b	54,421±0,263 ^j
	6	0,78±0,12 ^c	12,08±0,32 ^g	68,02±1,01 ^{cd}	92,19±0,58 ^{ef}	53,624±0,137 ⁱ
	9	0,91±0,03 ^{cd}	12,36±0,35 ^{gh}	66,99±0,64 ^c	91,70±0,69 ^e	52,558±0,214 ^h
	12	0,95±0,05 ^d	11,33±0,43 ^f	68,73±0,61 ^{def}	91,39±0,48 ^e	51,747±0,070 ^g
	15	1,27±0,17 ^e	12,52±0,01 ^h	68,34±0,23 ^{cde}	93,39±0,25 ^f	50,575±0,163 ^f
	18	1,26±0,06 ^e	11,11±0,22 ^{ef}	69,62±0,32 ^{efg}	91,83±0,60 ^{ef}	48,745±0,058 ^e
	21	1,94±0,13 ^f	10,70±0,22 ^e	70,20±0,44 ^{fg}	91,59±0,21 ^e	47,312±0,110 ^d
	24	1,98±0,07 ^f	9,24±0,23 ^c	68,62±0,68 ^{de}	87,09±1,10 ^c	46,616±0,323 ^c
	27	1,98±0,06 ^f	9,85±0,11 ^d	69,87±1,19 ^{efg}	89,56±1,39 ^d	45,622±0,136 ^b
	30	2,08±0,03 ^f	8,24±0,32 ^b	70,60±0,08 ^g	87,08±0,63 ^c	44,481±0,137 ^a

Moyennes de trois répétitions, Les moyennes suivies de la même lettre dans une colonne ne sont pas significativement différentes (p <0,05) suivant le test d'ANOVA de Fisher.

5.4.5 Mesures des diènes et triènes conjugués

La mesure de l'absorbance par UV nous permet d'évaluer la qualité de l'huile et pourrait être considéré comme un bon indicateur des huiles oxydés (Besbes *et al.*, 2005).

Les mesures dans la plage UV à 232nm, permet de déterminer la stabilité de l'huile en termes de composés primaires d'oxydation comme avec l'indice de peroxyde (Man et Jaswir, 2000). Ces deux analyses évaluent les hydroperoxydes formés (IP) et la mesure des diènes permet de donner une estimation de la teneur en AGPI conjugués. Au cours du procédé de friture, nous remarquons que ce paramètre évolue progressivement de façon croissante du 1^{er} jour au dernier jour de friture pour les huiles utilisées où les résultats sont présentés dans le **tableau 5-14**. L'HPRO est celle qui présente de faibles valeurs ($0,03 \pm 0,01$ - $0,67 \pm 0,15$), suivi de l'huile Frial ($0,22 \pm 0,01$ - $0,90 \pm 0,01$) et enfin de l'huile de soja ($0,19 \pm 0,01$ - $1,07 \pm 0,02$). Les faibles valeurs obtenues en 10 jours de friture dans les deux premières huiles citées ci-dessus, peuvent être due à une forte concentration en acide oléique ($72,97 \pm 0,53\%$ pour l'huile Frial et $42,45 \pm 0,14\%$ pour l'HPRO), les rendant ainsi plus résistantes que l'huile de soja. Smith *et al.*, (2007) ont évalué la résistance à l'oxydation et ont révélé que l'huile de tournesol oléique était plus résistante à l'oxydation de part sa concentration en acide oléique. Ils affirment par contre, que la formation des diènes conjugués durant la friture est fonction de la teneur en acide linoléique. C'est le cas de l'huile de soja qui présente une teneur de $53,59 \pm 0,10\%$. Ces deux hypothèses vérifient bien nos résultats.

Tableau 5-14 : Mesure des diènes et triènes conjugués au cours de la friture de la banane plantain

	Frial		Soja		HPRO	
Quantité de plantain (Kg)	Diènes (232nm)	Triènes (270nm)	Diènes (232nm)	Triènes (270nm)	Diènes (232nm)	Triènes (270nm)
0	0,22±0,01 ^a	0,041±0,01 ^a	0,185±0,01 ^a	0,01±0,00 ^a	0,03±0,010 ^a	0,02±0,01 ^a
3	0,38±0,01 ^b	0,112±0,00 ^b	0,293±0,01 ^b	0,08±0,00 ^b	0,20±0,04 ^b	0,10±0,02 ^{bcd}
6	0,46±0,01 ^c	0,121±0,00 ^c	0,375±0,01 ^c	0,08±0,00 ^{bc}	0,23±0,06 ^b	0,07±0,05 ^b
9	0,54±0,00 ^d	0,125±0,00 ^c	0,556±0,02 ^d	0,08±0,00 ^{bc}	0,27±0,03 ^b	0,10±0,01 ^{bc}
12	0,59±0,01 ^d	0,131±0,00 ^d	0,631±0,01 ^e	0,09±0,01 ^{bc}	0,39±0,03 ^c	0,13±0,01 ^{cde}
15	0,65±0,01 ^e	0,139±0,00 ^{de}	0,869±0,03 ^g	0,09±0,01 ^{cd}	0,46±0,05 ^{cd}	0,13±0,01 ^{cde}
18	0,71±0,0 ^f	0,144±0,00 ^e	0,842±0,04 ^f	0,10±0,01 ^{de}	0,40±0,03 ^c	0,10±0,02 ^{bcd}
21	0,75±0,02 ^f	0,149±0,00 ^e	0,959±0,02 ^h	0,11±0,01 ^e	0,55±0,07 ^d	0,16±0,03 ^{ef}
24	0,78±0,01 ^{fg}	0,146±0,01 ^e	1,070±0,02 ⁱ	0,14±0,01 ^f	0,57±0,07 ^{de}	0,14±0,01 ^{def}
27	0,86±0,02 ^h	0,154±0,00 ^f	0,185±0,01 ^a	0,01±0,00 ^a	0,55±0,09 ^d	0,15±0,02 ^{ef}
30	0,90±0,01 ⁱ	0,164±0,00 ^g	0,293±0,01 ^b	0,08±0,00 ^b	0,67±0,15 ^e	0,18±0,05 ^f

Moyennes de trois répétitions. Les moyennes suivies de la même lettre dans une colonne ne sont pas significativement différentes (p <0,05) suivant le test d'ANOVA de Fisher.

Une corrélation entre la viscosité et les diènes conjugués mesurés dans les trois huiles a été réalisée. Nous avons obtenus de très bonnes corrélations positives avec des coefficients de régression de 0,85 ; 0,97 et 0,98 respectivement pour l'HPRO, l'huile Frial et l'huile de soja.

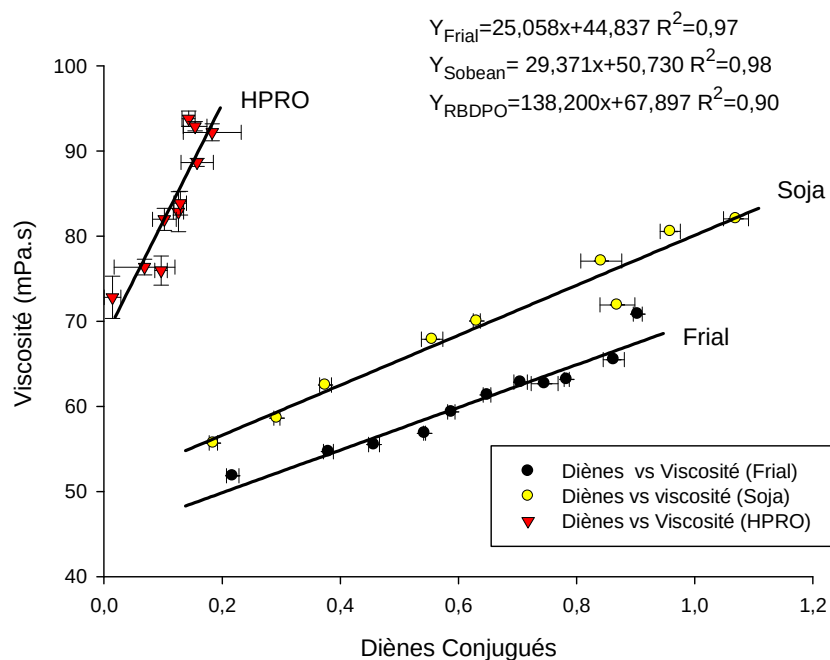


Figure 5-21 : Corrélations entre la viscosité mesurée à 25°C et les diènes conjugués pour les différentes huiles (Frial, soja et d'HPRO).

La mesure de l'absorbance à 270 nm nous a permis de détecter les composés d'oxydation secondaires formés à partir des composés primaires non stables. C'est une mesure qui est similaire à l'indice de para-anisidine qui mesure en particulier les cétones diéthyléniques (Man et Jaswir, 2000). Les résultats sont présentés dans le **tableau 5-14** et montrent une évolution croissante mais très faible dans chaque huile utilisée. Initialement, les huiles avaient des valeurs faibles autour de $0,04 \pm 0,01$ (Frial), $0,01 \pm 0,00$ (soja) et $0,02 \pm 0,01$ (HPRO). Elles ont évolué au cours de la friture jusqu'à atteindre des valeurs finales situées autour de $0,16 \pm 0,00$ (Frial), $0,14 \pm 0,01$ (soja) et enfin de $0,18 \pm 0,05$ (HPRO).

5.4.6 Evolution des propriétés thermiques lors du vieillissement des bains d'huiles

Au cours de la friture, le profil thermique des huiles a été largement modifié. Les résultats sont obtenus sur la base d'un seul pic de cristallisation exothermique pour les échantillons d'huiles Frial et de soja, comme obtenue dans les travaux de Tan et Man, (1999). Par contre, pour les échantillons d'HPRO, il apparaît un pic exothermique majeur entre -1°C et 0°C et un

pic mineur exothermique aux environs de -55°C. Les mêmes phénomènes ont été observés par Koh *et al.*, (2009) dans ses travaux sur l'HPRO.

Le **tableau 5-15** regroupe les pics de température et d'enthalpie des trois huiles au cours de la friture.

Tableau 5-15 : Analyse calorimétrique, mesurée par analyse thermique différentielle des différentes huiles utilisées au cours de la friture profonde de banane plantain.

Quantité de plantain (Kg)	Frial		Soja		HPRO	
	ΔH (J/g)	ΔT (°C)	ΔH (J/g)	ΔT (°C)	ΔH (J/g)	ΔT (°C)
0	41,91±0,61 ^j	-50,15±0,21 ^h	33,86±1,65 ^h	-52,43±0,12 ⁱ	1,84±0,20 ^c	-55,67±0,51 ^{ab}
3	40,87±1,90 ⁱ	-50,5±0,00 ^g	31,00±1,31 ^g	-53,63±0,06 ^h	2,09±0,09 ^c	-60,13±0,06 ^{ab}
6	37,59±0,48 ^h	-51,1±0,14 ^f	29,80±0,36 ^g	-54,80±0,00 ^g	1,96±0,68 ^c	-62,10±0,10 ^a
9	36,80±1,21 ^g	-51,4±0,14 ^e	27,62±0,92 ^f	-56,33±0,06 ^f	1,68±0,07 ^{bc}	-62,53±0,25 ^a
12	34,73±0,40 ^f	-51,9±0,00 ^d	25,09±1,26 ^e	-57,37±0,12 ^e	2,12±0,41 ^c	-63,27±0,15 ^a
15	34,25±0,54 ^f	-52,2±0,14 ^c	19,67±1,34 ^d	-59,13±0,06 ^d	2,00±0,29 ^c	-64,27±0,06 ^a
18	33,37±0,55 ^e	-52,4±0,00 ^c	17,25±1,68 ^c	-59,93±0,06 ^c	1,40±0,55 ^{abc}	-65,17±0,06 ^a
21	32,43±0,95 ^d	-52,4±0,00 ^c	14,55±1,28 ^b	-60,13±0,06 ^b	0,73±0,28 ^a	-66,33±2,00 ^a
24	30,78±1,55 ^c	-52,25±0,07 ^c	11,84±0,53 ^a	-61,87±0,06 ^a	1,10±0,40 ^{ab}	-66,40±0,27 ^a
27	28,1±1,45 ^b	-53,15±0,07 ^b	-	-	2,05±0,87 ^c	-66,70±0,46 ^b
30	25,64±0,41 ^a	-53,65±0,21 ^a	-	-	1,10±0,04 ^{ab}	-67,07±0,42 ^a

Moyennes de trois répétitions. Les moyennes suivies de la même lettre dans une colonne ne sont pas significativement différentes ($p < 0,05$) suivant le test d'ANOVA de Fisher.

On constate que, plus le traitement thermique est long, plus le pic de cristallisation se déplace en se décalant vers les températures les plus basses. L'enthalpie de cristallisation diminue systématiquement avec le déplacement de ce pic. Ce type de résultat a été obtenu par Tan et Man, 1999a ; Tan *et al.*, 2002 lors de leurs études sur le profil thermique des huiles de soja et de HPRO. Ceux-ci affirment que le changement du profil thermique de ces huiles est dû à la production et à l'accumulation des produits d'oxydation tels que les composés polaires, les dimères, polymères, hydroperoxydes et des aldéhydes, directement liés à la disparition des triglycérides insaturés. La diminution de l'enthalpie de cristallisation est attribuée à la formation des produits d'oxydation qui n'ont pas cristallisés dans la plage de température au cours de la friture comme l'ont indiqué certains auteurs (Gloria et Aguilera, 1998; Tan et Man, 1999b; Besbes *et al.*, 2005 ; Chiavaro *et al.*, 2009).

Les huiles végétales ont un profil thermique qui dépend de la proportion en AGI qu'elles contiennent. Les huiles Frial ($94,40 \pm 0,97\%$) et de soja ($85,67 \pm 0,03\%$) disposent d'un pourcentage élevé en AGI comparé à l'HPRO ($53,677 \pm 0,068\%$). Les pics de cristallisation des deux premières huiles sont plus visibles et montrent nettement le décalage (vers les basses températures) et la perte d'intensité du pic (enthalpie) au cours de la friture par rapport aux pics obtenus avec l'HPRO. Les données de cette dernière sont obtenues en tenant compte du petit pic qui apparaît vers -50°C . Ce pic se déplace vers les températures les plus basses lorsque l'HPRO subit un traitement thermique. Ceci peut être expliqué par le fait que, le pic principal (Frial et soja) et mineur (HPRO) a été associé à la cristallisation des TAG hautement insaturé, tandis que le pic majeur dans l'HPRO a été attribuée à la cristallisation des fractions de TAG saturés des huiles (Chiavaro *et al.*, 2009).

L'huile frial est la plus stable car son pic de cristallisation s'est déplacé d'environ 3°C par rapport au profil de l'huile initiale et présente une très bonne corrélation ($R^2=0,98$) avec le temps de friture. Les valeurs des pics sont situées de $-50,15 \pm 0,21^{\circ}\text{C}$ à $-53,65 \pm 0,21^{\circ}\text{C}$. L'énergie dégagée ou enthalpie de cristallisation de cette dernière a également varié de $41,91 \pm 0,61\text{J/g}$ à $25,64 \pm 0,41\text{J/g}$. Les huiles de soja et de palme présentent par contre une variation d'environ 10°C entre le début et la fin du procédé de friture avec des pics de cristallisation qui varient de $-52,43 \pm 0,12^{\circ}\text{C}$ à $-61,87 \pm 0,06^{\circ}\text{C}$ avec un coefficient de régression de $R^2=0,99$ et de $-55,66 \pm 0,51^{\circ}\text{C}$ à $-67,06 \pm 0,41^{\circ}\text{C}$ avec $R^2=0,98$ respectivement (voir les **figures 5-22**). L'enthalpie de cristallisation varie également entre $33,86 \pm 1,65\text{J/g}$ et $11,84 \pm 0,53\text{J/g}$ pour l'huile de soja. Dans le cas de cette dernière, nous avons remarqué qu'au fur et à mesure du procédé de friture, le pic a tendance à disparaître. La détection des pics de cristallisation chez l'HPRO a nécessité de faibles apports en énergie, lesquelles sont fluctuantes et ne dépassent pas 2J/g .

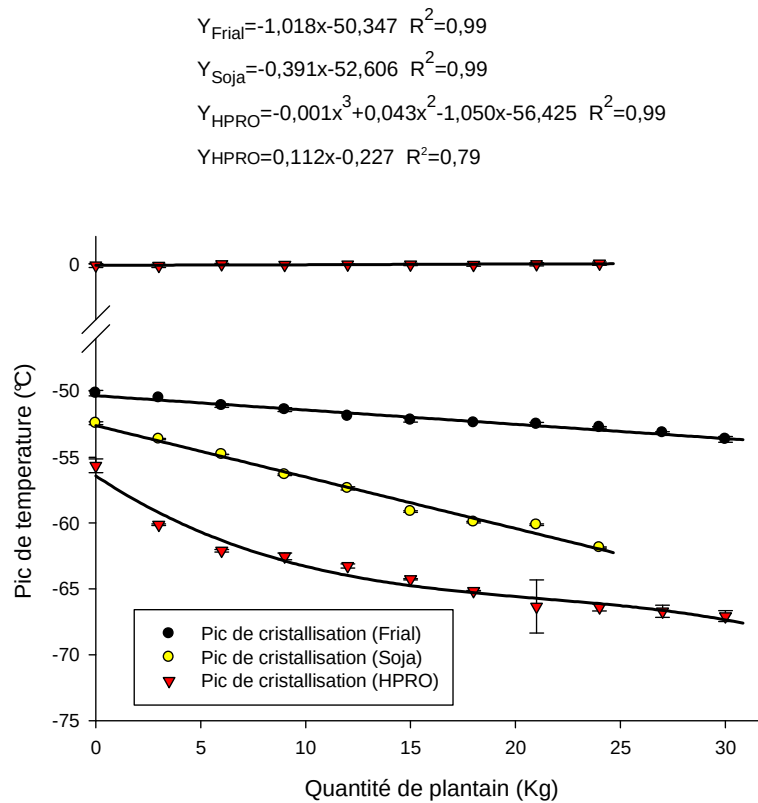


Figure 5-22 : Evolution du profil thermique mesuré par DSC en fonction de la quantité de banane plantain frite dans les différentes huiles (Frial, soja et d'huile de palme raffinée oléine HPRO).

Des corrélations (voir les **figures 5-23** et **5-24**) ont été faites avec les composés polaires totaux obtenus par la méthode officielle sur colonne de silice et par le capteur Ebro pour les trois huiles. Nous avons indiqué précédemment que les produits d'oxydation des huiles comme les CPT sont responsables du décalage du pic de cristallisation vers les basses températures. Plus les composés polaires augmentent plus on assiste au décalage du pic suivi de la diminution de l'enthalpie.

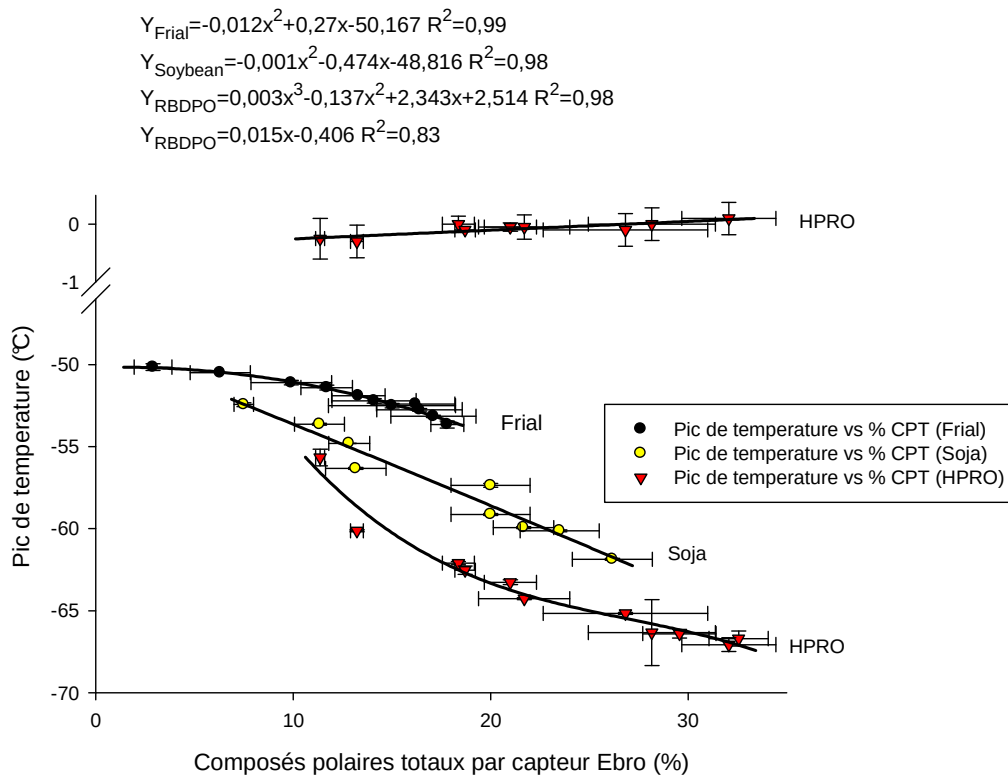


Figure 5-23 : Corrélations entre le profil thermique mesuré par DSC et les CPT mesurés par le capteur Ebro pour les différentes huiles (Frial, soja et HPRO).

Comme peuvent le montrer les figures obtenues par analyse thermique différentielle, on observe de bonnes corrélations positives et négatives entre les pics de température et les CPT. Dans le cas des corrélations avec la méthode officielle, nous avons obtenu une corrélation négative avec l'huile Frial ($R^2=0,95$). Par contre, nous avons obtenu des corrélations positives avec les huiles de soja et palme raffinée oléine avec des coefficients de corrélation de $R^2=0,99$ et $R^2=0,95$, respectivement. Avec la méthode utilisant le capteur Ebro, on observe également des corrélations négatives pour les huiles Frial et de soja avec des bons coefficients de régression de $R^2=0,98$ et $R^2=0,90$, respectivement. Une corrélation positive avait été obtenue avec l'HPRO avec un bon coefficient de régression de $R^2=0,97$.

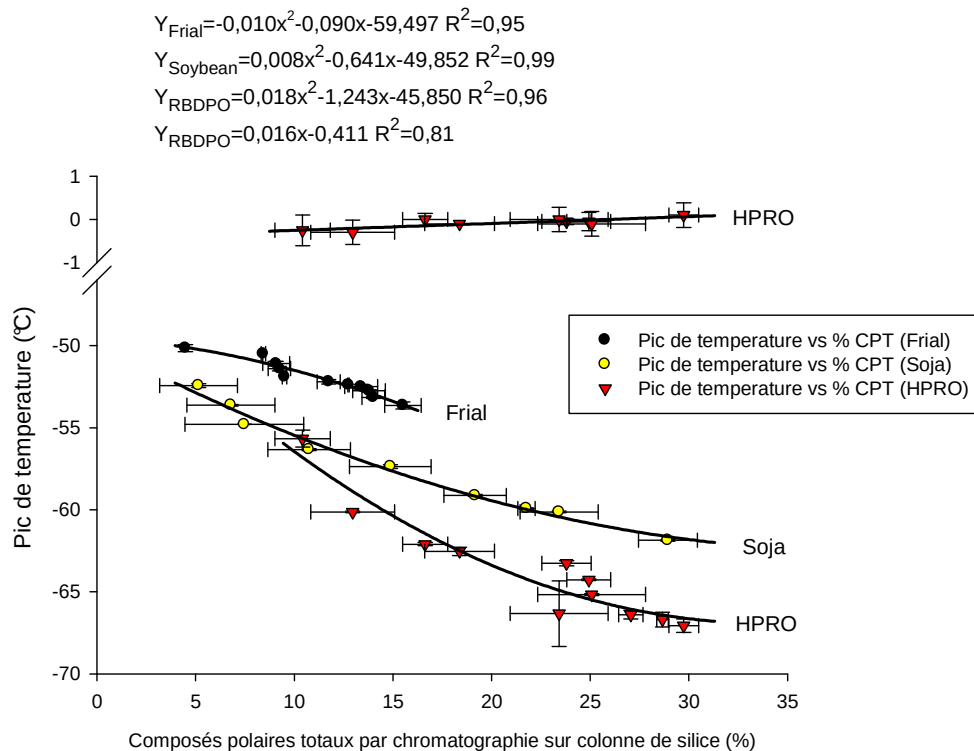


Figure 5-24 : Corrélations entre le profil thermique mesuré par DSC et les CPT mesurés par méthode chromatographique pour les différentes huiles (Frial, soja et d'huile de palme raffinée oléine HPRO).

Compte tenu des bonnes corrélations obtenues entre la DSC et les CPT dans tous les cas menés, la mesure de la détérioration de l'huile par DSC peut être considérée fiable pour évaluer la qualité de l'huile. Ce qui a été mentionné dans les travaux de Tan et Man en 1999.

Temps d'induction à l'oxydation

La stabilité à l'oxydation ou temps d'induction (Coppin et Pike, 2001) des huiles végétales est un point important sur le critère de conservation. Pour l'évaluer, nous avons utilisé l'analyse thermique différentielle afin de déterminer le temps d'induction de l'oxydation des huiles végétales (Tan *et al.*, 2002).

La réaction d'oxydation exothermique produite au cours du temps pour les trois huiles et à trois températures d'oxydation fixées, donne des courbes ayant une allure similaire, à l'exception du temps requis pour la réaction d'oxydation. T_0 représente la mesure relative de la stabilité de l'huile à l'oxydation obtenu par extrapolation. Dans le traitement des données, nous n'avons pas tenu compte de l'énergie enthalpique dégagée par la réaction d'oxydation.

Les mesures obtenues sont la moyenne de deux répétitions et sont présentées dans le **tableau 5-16**.

Tableau 5-16 : Mesure du temps d'induction à l'oxydation des différentes huiles par analyse thermique différentielle

Huile	OIT T ₀ (min)		
	110°C	130°C	140°C
Frial	320,15±2,33 ^c	92,85±0,92 ^b	43,95±0,35 ^a
Soja	137,55±8,98 ^c	36,75±2,90 ^b	19,95±0,07 ^a
Palme RO	433,85±1,77 ^c	229,55±0,64 ^b	113,95±0,35 ^b

Moyennes de deux répétitions ± écartypes. Les moyennes suivies de la même lettre dans une colonne ne sont pas significativement différentes (p <0,05) suivant le test d'ANOVA de Fisher.

Dans la littérature, il est mentionné que les huiles végétales ayant un degré d'insaturation élevé sont plus susceptibles à l'oxydation. C'est le cas des huiles Frial et de soja qui présentent un indice d'iode élevé autour de 226,00±0,97 g de I₂/100g et 132,41±1,86 g de I₂/100g respectivement. L'huile de palme par contre présente un indice d'iode de 55,10±0,20 g de I₂/100g. En principe, compte tenu de la valeur élevée de l'indice d'iode de l'huile Frial, celle-ci devrait donner un OIT plus bas que celui de l'huile de soja pour chaque température fixée. Mais les résultats montrent le contraire. A 110°C les huiles Frial, de soja et de palme raffinée oléine ont un OIT respectivement de 320±2 minutes ; 137±9 minutes et 433±2 minutes. A 130°C ces mêmes huiles présentent un OIT à 92±1 minutes ; à 36±3 minutes et à 229±1 respectivement. Et enfin à 140°C ces mêmes huiles présentent également un OIT à 43±0,3 minutes, à 19±0 minutes et à 113±0,3 minutes respectivement. Le fait que l'huile Frial s'oxyde moins vite que l'huile de soja peut s'expliquer par le fait que l'huile Frial contient des antioxydants et une faible proportion d'huile de coriandre plus résistante à l'oxydation. L'HPRO a plutôt montré des temps d'induction à l'oxydation beaucoup plus faibles vu son indice d'iode relativement bas.

5.4.7 Evolution de la couleur de l'huile de friture

L'évolution de la couleur des différentes huiles utilisées pour la friture du plantain a été mesurée au cours du procédé. C'est un paramètre qui permet au non expert d'avoir une estimation subjective de la qualité de l'huile détériorée (Abdulkarim *et al.*, 2007). Selon plusieurs auteurs (Maskan, 2003 ; Bansal *et al.*, 2010 ; Bhattacharya *et al.*, 2008 ; Enriquez-Fernandez *et al.*, 2011), le changement de couleur de l'huile serait la conséquence des réactions combinées d'oxydation, de polymérisation et bien d'autres modifications chimiques. Le **tableau 5-17** présente l'évolution des différentes coordonnées de couleur L^* , a^* , b^* et du paramètre ΔE respectivement pour les huiles Frial, de soja et de palme raffinée oléine.

Le passage de la couleur clair à une couleur jaune pâle serait due à la présence des acides gras oxydés et carbonylés alimentaires (Paul *et al.*, 1997 ; Belbin, 1999 ; Bansal *et al.*, 2010). Au cours du procédé de friture, le paramètre L^* baisse tout au long de la friture de $95,27 \pm 0,08$ - $86,68 \pm 0,03$ pour l'huile Frial, de $94,87 \pm 0,10$ - $86,81 \pm 0,04$ pour l'huile de soja. On enregistre par contre, des valeurs fluctuantes avec cette coordonnée pour l'huile HPRO. On pourrait penser qu'elle n'est pas affectée par la valeur de L^* qui sont fluctue entre $86,33 \pm 0,33$ et $80,55 \pm 0,05$. De bonnes corrélations négatives ont été obtenues pour cette coordonnée en fonction du temps de friture (figures non représentées) avec des coefficients de régression de 0,83 ; 0,93 et de 0,99 respectivement pour les huiles de palme raffinée oléine, Frial et soja.

Pour toutes les huiles, la coordonnée a^* était négative et a baissé tout au long de la friture. L'huile de soja présente la coordonnée qui a le plus baissé ($-2,57 \pm 0,05$ à $-6,06 \pm 0,04$), comparé à l'huile Frial ($-1,58 \pm 0,03$ à $-4,45 \pm 0,01$). La mesure de la coordonnée a^* dans l'huile HPRO a donné des résultats comme pour le cas de la clarté L^* . De bonnes corrélations négatives (Frial et soja) et positive (HPRO) (où les figures ne sont pas présentées) ont été obtenues avec des coefficients de 0,94 ; 0,96 et 0,68, respectivement.

La coordonnée b^* et le paramètre de couleur ΔE ont évolué positivement en augmentant depuis le premier jour jusqu'au dernier jour de friture pour chaque huile. La coordonnée b^* a varié pour l'huile Frial de $6,47 \pm 0,07$ à $34,32 \pm 0,02$; l'augmentation du paramètre b^* pour l'huile de soja varie de $10,52 \pm 0,05$ à $34,66 \pm 0,05$ et enfin pour l'huile HPRO le paramètre passe de $30,70 \pm 0,21$ à $59,14 \pm 0,04$. Rappelons que lorsque la coordonnée b^* est positive, il définit la coloration jaune dans l'espace CIELab. L'augmentation de ces valeurs prouve bien ce que l'œil nu peut percevoir par le passage du jaune clair au jaune sombre de l'huile.

Tableau 5-17 : Mesures des paramètres L*, a*, b* des huiles Frial, de soja et de palme raffinée oléine en fonction de la durée de la friture profonde

	Quantité de plantain (Kg)	L*	a*	b*	ΔE
Frial	0	95,27±0,08 ^h	-1,58±0,03 ^g	6,47±0,07 ^a	0,00±0,00 ^a
	3	93,20±0,12 ^g	-2,79±0,05 ^f	16,04±0,04 ^b	9,86±0,06 ^b
	6	91,14±0,02 ^f	-4,84±0,01 ^b	22,24±0,00 ^c	16,62±0,08 ^c
	9	86,65±0,08 ^c	-4,77±0,24 ^{bc}	25,24±0,04 ^d	20,90±0,13 ^d
	12	86,24±0,05 ^b	-4,85±0,01 ^b	29,36±0,02 ^e	24,82±0,09 ^e
	15	84,21±0,02 ^a	-4,27±0,02 ^e	32,55±0,03 ^g	28,46±0,10 ⁱ
	18	87,99±0,16 ^e	-4,99±0,04 ^a	32,52±0,02 ^g	27,26±0,05 ^f
	21	86,31±0,16 ^b	-4,46±0,02 ^d	32,39±0,06 ^f	27,58±0,10 ^g
	24	87,48±0,13 ^d	-4,64±0,05 ^c	33,43±0,11 ^h	28,23±0,21 ^h
	27	88,09±0,13 ^e	-4,77±0,01 ^{bc}	33,53±0,05 ⁱ	28,18±0,10 ^h
	30	86,68±0,03 ^c	-4,45±0,01 ^d	34,32±0,02 ^j	29,29±0,11 ^j
Soja	0	94,87±0,10 ^e	-2,57±0,05 ^f	10,52±0,05 ^a	0,00±0,00 ^a
	3	89,03±0,05 ^d	-2,45±0,01 ^g	15,50±0,03 ^b	7,68±0,06 ^b
	6	86,09±0,04 ^{bc}	-2,45±0,06 ^g	18,19±0,02 ^c	11,66±0,05 ^c
	9	84,58±0,12 ^a	-3,33±0,02 ^e	21,77±0,04 ^d	15,27±0,08 ^d
	12	84,43±1,85 ^a	-4,77±0,01 ^d	28,53±0,07 ^e	20,98±0,90 ^f
	15	85,43±0,12 ^{ab}	-4,77±0,01 ^d	28,53±0,07 ^e	20,45±0,02 ^e
	18	85,34±0,13 ^{ab}	-5,19±0,05 ^c	30,86±0,12 ^f	22,62±0,06 ^g
	21	87,10±0,08 ^c	-5,62±0,03 ^b	31,67±0,09 ^g	22,74±0,08 ^g
	24	86,81±0,04 ^c	-6,06±0,04 ^a	34,66±0,05 ^h	25,69±0,06 ^h
HPRO	0	86,33±0,33 ^h	-3,68±0,04 ^b	30,70±0,21 ^a	0,00±0,00 ^a
	3	85,61±0,21 ^g	-3,88±0,05 ^e	43,10±0,08 ^c	12,44±0,24 ^b
	6	81,64±0,09 ^{cd}	-3,45±0,03 ^c	42,42±0,13 ^b	12,63±0,14 ^b
	9	80,55±0,05 ^a	-3,45±0,03 ^g	43,31±0,04 ^c	13,89±0,15 ^c
	12	81,38±0,08 ^{bc}	-3,60±0,03 ^f	45,20±0,02 ^d	15,34±0,14 ^d
	15	81,21±0,17 ^b	-3,50±0,03 ^g	45,60±0,18 ^e	15,77±0,14 ^e
	18	84,07±0,05 ^e	-4,47±0,01 ^a	47,36±0,05 ^f	16,81±0,15 ^f
	21	84,22±0,14 ^e	-4,45±0,04 ^a	49,81±0,16 ^g	19,22±0,14 ^g
	24	81,92±0,27 ^d	-3,74±0,03 ^{de}	52,73±0,23 ^h	22,47±0,10 ^h
	27	84,93±0,34 ^f	-4,24±0,06 ^b	56,64±0,32 ⁱ	25,98±0,36 ⁱ
	30	84,62±0,09 ^f	-3,75±0,05 ^d	59,14±0,04 ^j	28,49±0,18 ^j

L* (L* = 0 [noir] et L* = 100 [blanc]), a* (-a* = vert et +a* = rouge), b* (-b* = bleu et +b* = jaune)

Moyennes de trois répétitions. Les moyennes suivies de la même lettre dans une colonne ne sont pas significativement différentes (p <0,05) suivant le test d'ANOVA de Fisher.

De très bonnes corrélations négatives et positives (figures non représentées) ont été obtenues avec des coefficients de corrélation de +0,99 (Frial), de -0,99 (soja) et de +0,97 (HPRO). Le paramètre ΔE dans toutes les huiles a augmenté et indique que les huiles ont bien subi une altération au niveau de la couleur par assombrissement où les valeurs ont atteint un maximum de $29,29 \pm 0,11$ pour l'huile Frial, $25,69 \pm 0,06$ pour l'huile de soja et enfin $28,49 \pm 0,18$ pour l'HPRO.

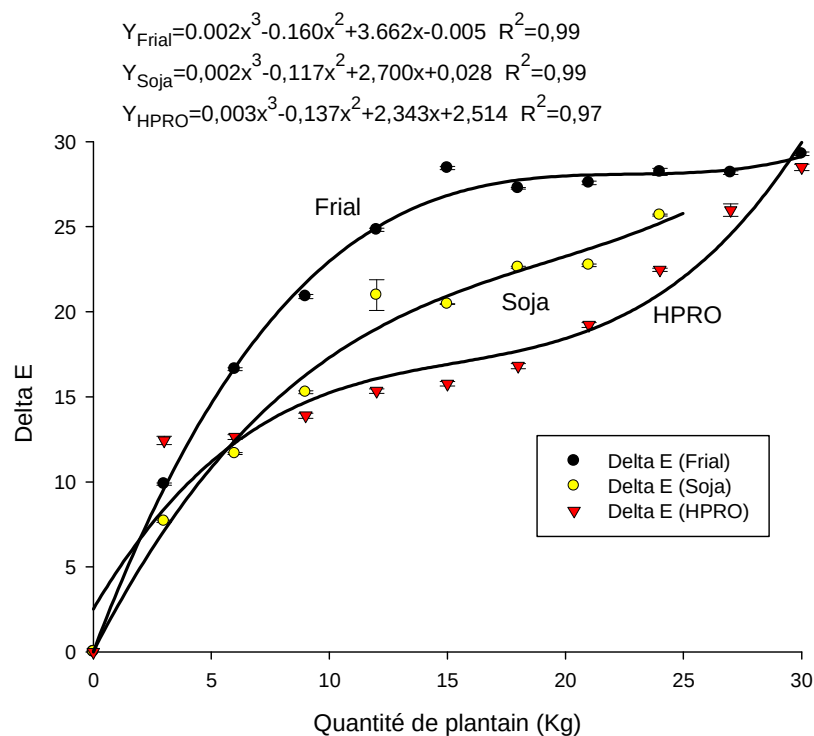


Figure 5-25 : Evolution de la différence de couleur (ΔE) mesurée par le lovibond pour les différentes huiles (Frial, soja et huile de palme raffinée oléine HPRO).

5.5 EVALUATION DES PROPRIETES PHYSICOCHIMIQUES DE LA BANANE PLANTAIN AU COURS DU VIEILLISSEMENT DES HUILES

5.5.1 Evolution de la couleur de la banane plantain frite

La couleur est l'un des critères de qualité des aliments qui ont une importance pour son acceptabilité par le consommateur. C'est pourquoi nous avons évalué la couleur du plantain après chaque friture (voir le **tableau 5-18**). Dans le cas des fruits et légumes par exemple, la

couleur finale du produit frit dépend de la nature, de la maturité, de la quantité de sucres réducteurs et d'autres composés biochimiques, et surtout des conditions de friture.

Les résultats obtenus sur la couleur de la banane plantain frite dans les trois huiles étaient similaires avec des valeurs de ΔE qui n'ont pas assez variées dans chaque cas pour chaque jour de friture. Il est mentionné dans la littérature, que certains paramètres comme la température de l'huile, le type d'huile, la dimension de l'échantillon, le ratio substrat / huile aurait des effets sur la couleur du produit frit. Dans ce travail, la préparation du plantain dans les conditions de friture différentes nous a permis d'avoir des résultats proches et satisfaisants à nos attentes.

Tableau 5-18 : Evolution de la couleur de la banane plantain en fonction du vieillissement des huiles au cours du procédé de friture profonde

Type d'huile	Quantité de banane plantain (Kg)	L*	a*	b*	ΔE
Frial	0	66,13±0,12 ^e	14,14±0,06 ^d	30,06±0,08 ^{bc}	17,31±0,90 ^a
	3	59,46±8,38 ^d	10,09±1,37 ^c	42,53±7,14 ^d	21,06±2,04 ^{bc}
	6	46,68±2,27 ^{bc}	6,69±0,49 ^{ab}	30,16±3,79 ^{bc}	20,82±1,57 ^{bc}
	9	46,26±1,45 ^{bc}	8,37±0,49 ^{bc}	30,09±2,78 ^{bc}	20,82±1,57 ^{bc}
	12	42,36±3,49 ^{ab}	9,45±1,41 ^c	26,09±3,58 ^{ab}	24,71±3,72 ^d
	15	45,70±2,51 ^{bc}	5,83±1,21 ^a	27,44±2,94 ^{abc}	22,38±1,89 ^{cd}
	18	39,28±1,65 ^a	8,81±0,63 ^c	23,06±4,03 ^a	28,40±2,87 ^e
	21	41,98±2,04 ^{ab}	8,06±0,77 ^{bc}	25,24±1,53 ^{ab}	25,40±2,05 ^{de}
	24	46,38±0,86 ^{bc}	10,09±1,59 ^c	30,48±0,99 ^{bc}	20,21±1,12 ^{bc}
	27	49,49±0,53 ^c	6,01±1,25 ^a	31,64±1,30 ^c	18,63±1,04 ^b
	30	44,60±0,56 ^{bc}	6,37±2,23 ^{ab}	27,58±1,14 ^{abc}	23,11±0,51 ^{cd}
Soja	0	72,20±1,99 ^e	6,06±1,71 ^{ab}	32,89±3,22 ^b	0,00±0,00 ^a
	3	45,29±0,93 ^{bc}	6,72±0,46 ^{abc}	29,67±3,32 ^{ab}	27,17±1,35 ^c
	6	46,56±0,88 ^c	7,88±0,41 ^{bcd}	30,28±1,84 ^{ab}	26,11±3,45 ^{bc}
	9	40,72±0,41 ^a	9,90±0,79 ^{de}	28,94±1,93 ^{ab}	32,01±2,24 ^d
	12	45,75±2,24 ^c	6,83±0,98 ^{abc}	29,08±2,95 ^{ab}	26,80±2,05 ^{bc}
	15	43,20±2,62 ^{ab}	8,75±1,52 ^{cde}	31,04±6,02 ^{ab}	29,30±1,06 ^{cd}
	18	46,29±0,95 ^c	10,20±1,54 ^e	30,29±0,72 ^{ab}	26,51±3,45 ^{bc}
	21	49,52±0,59 ^d	5,59±0,66 ^a	30,80±0,72 ^{ab}	23,02±2,82 ^b
	24	44,79±0,37 ^{bc}	6,42±2,29 ^{ab}	27,55±0,93 ^a	28,01±2,29 ^{cd}
HPRO	0	64,65±2,24 ^c	9,96±0,83 ^e	33,09±2,12 ^d	0,00±0,00 ^a
	3	40,81±0,33 ^a	9,85±0,42 ^e	28,82±1,78 ^{abc}	24,35±2,02 ^b
	6	42,48±0,71 ^{ab}	9,43±0,55 ^e	30,45±5,14 ^{abcd}	22,70±1,68 ^b
	9	42,20±0,58 ^{ab}	7,59±1,04 ^{cd}	27,62±0,82 ^{ab}	23,31±2,10 ^b
	12	42,88±0,72 ^b	10,56±0,93 ^e	30,42±0,64 ^{abcd}	22,06±1,96 ^b
	15	42,34±0,43 ^{ab}	7,99±0,27 ^d	30,61±1,30 ^{abcd}	22,70±2,19 ^b
	18	41,18±1,30 ^{ab}	5,90±0,16 ^{ab}	30,80±0,72 ^{bcd}	23,99±1,05 ^b
	21	42,36±1,20 ^{ab}	7,52±0,35 ^{cd}	29,24±2,67 ^{abc}	22,93±0,95 ^b
	24	42,51±0,29 ^{ab}	6,72±0,46 ^{bc}	31,11±0,84 ^{cd}	22,54±1,95 ^b
	27	42,51±0,17 ^{ab}	5,92±0,14 ^{ab}	30,80±0,72 ^{bcd}	22,70±2,18 ^b
	30	42,12±2,36 ^{ab}	5,08±1,37 ^a	27,21±0,63 ^a	23,85±0,64 ^b

L* (L* = 0 [noir] et L* = 100 [blanc]), a* (-a* = vert et +a* = rouge), b* (-b* = bleu et +b* = jaune)

Moyennes de trois répétitions. Les moyennes suivies de la même lettre dans une colonne ne sont pas significativement différentes (p < 0,05) suivant le test d'ANOVA de Fisher.

5.5.2 Mesure de la teneur en eau et huile

Les teneurs en eau et en huile de la banane plantain après friture ont été déterminées et sont représentées par le **tableau 5-19**. Nous remarquons que le même type de résultat est obtenu pour les trois cas où la teneur en eau est réduite de 52-54% après friture. Le départ de l'eau s'explique par les transferts qui se déroulent au moment des premières secondes de friture. Nous ne remarquons pas de différence nette sur cette teneur en eau, quelque soit le temps de friture.

La teneur en huile contenue dans le plantain après friture varie en fonction de la nature de l'huile. En général, pour toutes les huiles utilisées, on observe une augmentation graduelle, peu significative durant les quelques jours de friture qui ont été étudiés.

Tableau 5-19 : Variation de la teneur en eau et en huile de la banane plantain

Type d'huile	Quantité de banane plantain (Kg)	T.E (%)	TH (%)
Frial	0	67,07±0,64 ^f	0,30±0,02 ^a
	3	51,06±1,84 ^c	5,42±0,26 ^b
	9	50,58±0,97 ^b	5,24±0,07 ^b
	15	59,30±0,07 ^e	5,30±0,41 ^b
	21	49,75±5,43 ^a	5,51±0,52 ^b
	27	53,14±0,55 ^d	6,51±1,41 ^c
Soja	0	68,29±0,31 ^h	0,16±0,07 ^a
	3	54,59±0,77 ^{e^f}	3,45±0,5 ^b
	9	54,86±0,96 ^g	4,29±0,23 ^c
	15	52,99±0,84 ^{cd}	4,41±0,30 ^c
	21	51,14±0,54 ^b	4,42±0,52 ^c
HPRO	0	67,61±0,40 ^d	0,16±0,07 ^a
	3	54,22±1,49 ^c	8,25±2,42 ^e
	9	52,20±0,18 ^a	5,23±0,44 ^c
	15	53,46±0,99 ^b	4,93±0,20 ^b
	21	54,31±1,02 ^c	6,72±1,43 ^d
	27	54,16±0,30 ^c	6,61±0,37 ^d

Moyennes de trois répétitions. Les moyennes suivies de la même lettre dans une colonne ne sont pas significativement différentes ($p < 0,05$) suivant le test d'ANOVA de Fisher,

Cette augmentation de la teneur en huile retenue dans la matrice alimentaire peut être la conséquence de la production des produits de dégradation tels que les composés polaires qui augmentent la viscosité de l'huile et facilitent alors son adhérence au produit alimentaire. Notons aussi comme l'ont indiqué certains auteurs, la phase de retrait du bain et du refroidissement du produit qui affectent la capacité d'absorption d'huile. L'absorption d'huile maximale par la banane plantain frite est obtenue en utilisant l'huile de palme raffinée ($6,61 \pm 0,37\%$ pour 25g de plantain), suivi de l'huile Frial ($6,51 \pm 1,41\%$ pour 25g de plantain) et enfin l'huile de soja ($4,42 \pm 0,52\%$ pour 25g de plantain).

5.5.3 Evaluation du profil de texture de la banane plantain

Le profil de texture de la banane plantain fraîche et frite dans les conditions optimales est présenté dans le **tableau 5-20**. Les valeurs obtenues sont les résultats de la force de déformation (N) appliquée au produit à l'aide d'un appareil de compression (Lloyd) dont la **figure 5-26** décrit cette déformation en fonction du temps. Plusieurs attributs du profil de texture sont générés à la fin de la double morsure appliquée, mais nous n'avons retenu que quelque uns d'entre eux.

Tableau 5-20 : Profil de texture des tranches de banane plantain

Nature de l'huile	Nature de la banane plantain	Dureté (N)	Cohésion (N)	Adhésion (N)	Masticabilité (N.mm)	Rigidité (N/mm)
Frial	Frais	$59,16 \pm 6,33$	$2,42 \pm 0,34$	$14,46 \pm 0,52$	$32,08 \pm 6,10$	$20,18 \pm 0,88$
	Lot frit 1	$25,86 \pm 0,16$	$1,89 \pm 0,27$	$5,00 \pm 0,75$	$11,99 \pm 4,39$	$6,48 \pm 0,23$
	Lot frit 2	$28,13 \pm 2,01$	$1,75 \pm 0,16$	$5,00 \pm 0,10$	$12,57 \pm 0,16$	$7,25 \pm 1,18$
	Lot frit 3	$16,83 \pm 1,15$	$2,85 \pm 0,20$	$4,88 \pm 0,07$	$23,43 \pm 6,05$	$5,07 \pm 0,19$
Soja	Lot frit 1	$24,18 \pm 1,05$	$1,74 \pm 0,02$	$4,28 \pm 0,23$	$9,14 \pm 0,61$	$8,25 \pm 0,02$
	Lot frit 2	$27,22 \pm 5,86$	$1,57 \pm 0,25$	$4,29 \pm 0,24$	$20,39 \pm 5,99$	$7,91 \pm 0,77$
	Lot frit 3	$21,53 \pm 4,80$	$1,58 \pm 0,24$	$3,53 \pm 1,30$	$7,04 \pm 3,59$	$6,76 \pm 2,13$
HPRO	Lot frit 1	$22,61 \pm 0,50$	$1,93 \pm 0,00$	$4,45 \pm 0,10$	$7,39 \pm 0,65$	$8,03 \pm 1,40$
	Lot frit 2	$31,59 \pm 0,65$	$1,58 \pm 0,02$	$5,09 \pm 0,17$	$9,78 \pm 0,44$	$9,69 \pm 0,58$
	Lot frit 3	$23,79 \pm 0,04$	$1,69 \pm 0,06$	$4,09 \pm 0,14$	$8,11 \pm 0,32$	$9,24 \pm 0,46$

Moyennes de trois répétitions.

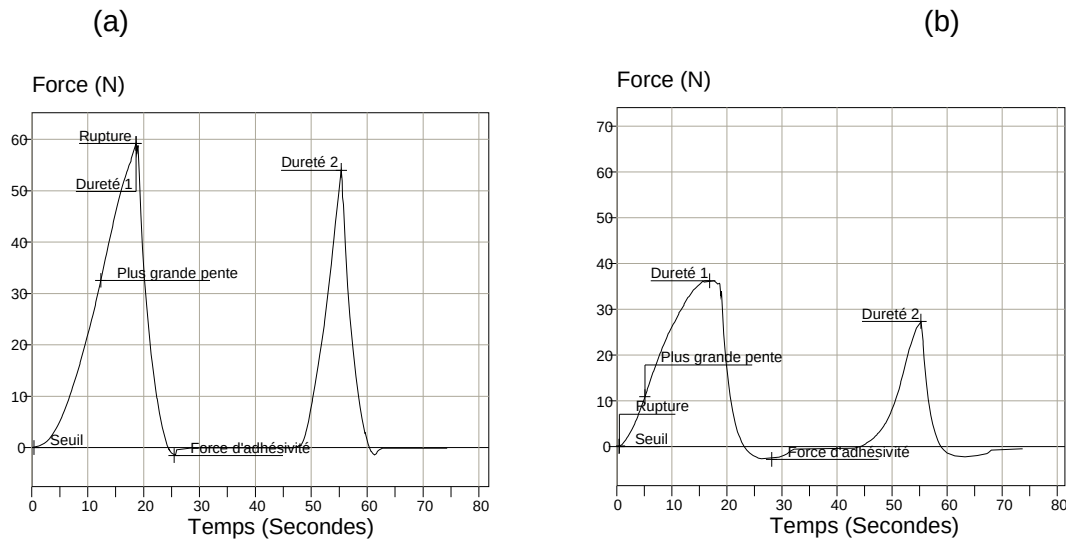


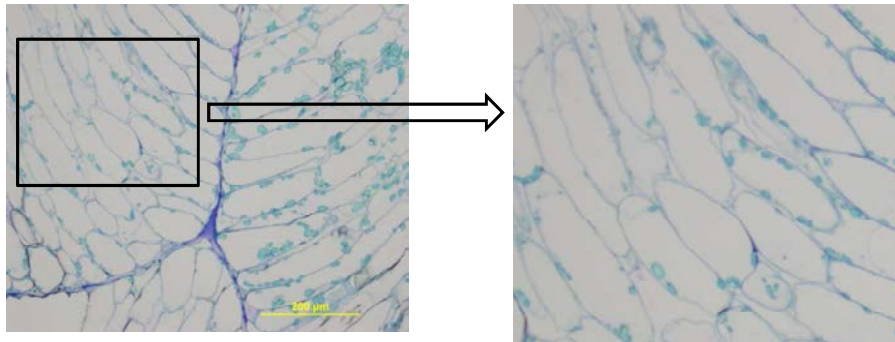
Figure 5-26 : Courbes typiques de double morsure (compression) de la banane plantain mûre fraîche (a) et frite (b) dans les conditions optimales de friture.

Par rapport à la figure et aux résultats présentés dans le tableau nous remarquons qu'il y a un écart net sur les cinq attributs du profil de texture énumérés entre la banane plantain fraîche et frite. Avant friture la banane plantain avait une dureté ferme ($59,16 \pm 6,33$ N) qui diminue après cuisson (varie entre 17–31 N). Cette diminution s'explique par le fait que la gélatinisation de l'amidon natif et la solubilisation de la lamelle moyenne qui ont lieu pendant la friture, s'accompagnent d'un départ d'eau. Certaines valeurs un peu élevées peuvent être associées à un refroidissement des échantillons entre deux mesures.

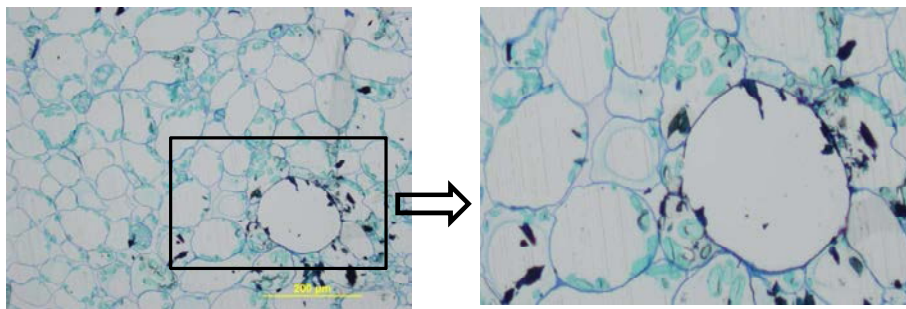
La masticabilité, la cohésion, l'adhésion, la rigidité tout comme le reste des autres paramètres diminuent également après friture de la banane plantain, suite à la gélatinisation de l'amidon et à la solubilisation de la lamelle médiane moyenne. Nous pouvons donc conclure que la friture a eu un effet positif sur la texture. Kita *et al.*, 2007 indiquent dans leurs travaux que le choix du milieu de friture peut avoir des effets sur les qualités sensorielles finales recherchées par le consommateur, dans les produits frits. Les trois huiles utilisées dans notre étude font partie de la large gamme d'huile qui est couramment utilisée en friture de nos jours. Quelque soit l'huile utilisée, le profil de texture semble être le même pour chaque cas.

5.6 OBSERVATION DE LA STRUCTURE DE LA BANANE PLANTAIN AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

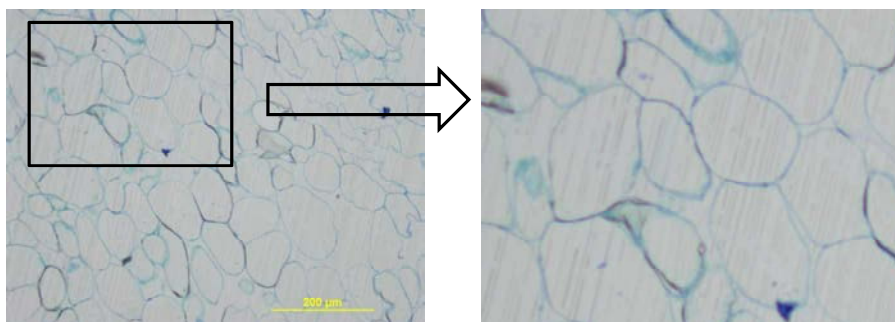
Les images ci-dessous présentent la structure des tranches de banane plantain avant et après friture. Nous allons nous attarder sur l'observation au MEB, laquelle nous permet de mieux interpréter le résultat.



Centre frais

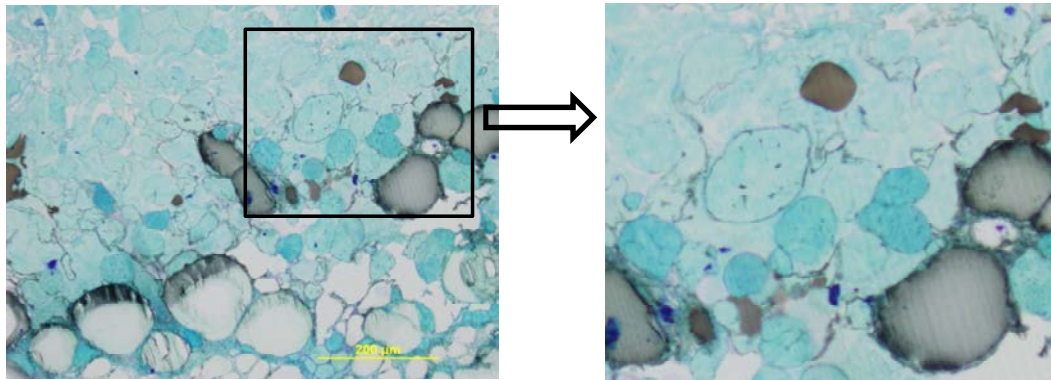


Intermédiaire frais

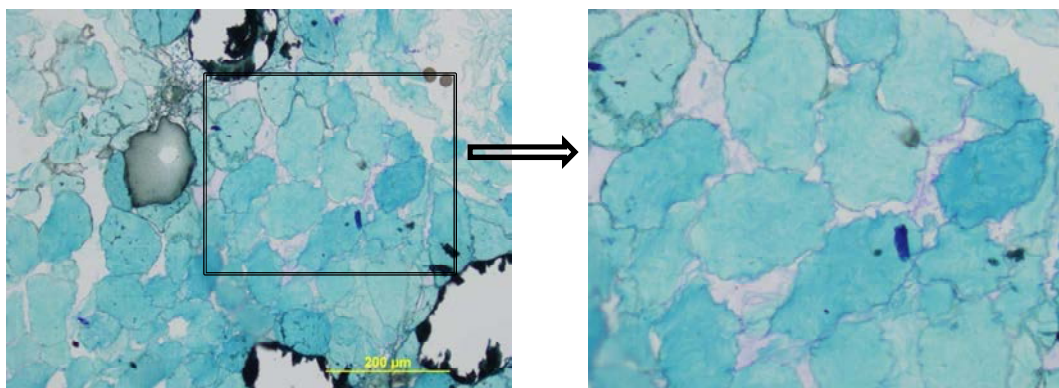


Extérieur frais

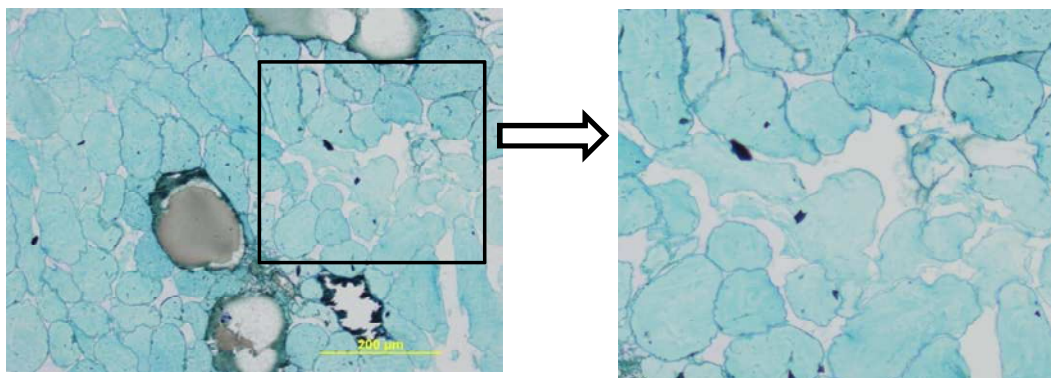
Figure 5-27 : Observation au microscope électronique optique de la structure de la banane plantain avant friture.



Centre frit



Intermédiaire frit



Extérieur frit

Figure 5-28: Observation au microscope électronique optique de la structure de la banane plantain après friture.

Les observations faites sur les parties centrale, extérieure et intermédiaire de la tranche, montrent que la structure cellulaire avant friture présente de gros granules d'amidon de forme ovale, de moyenne et grande tailles bien visibles et bien délimités. La forme des granules dans la partie centrale est plus allongée que celle dans les parties extérieure et intermédiaire de la banane plantain. Après friture, le substrat perd sa structure cellulaire de départ suite à la dissolution de la lamelle moyenne de la paroi cellulaire endommagée. Certains grains d'amidon natifs ont perdu leur intégrité, ce qui conduit à leur fusion pour donner une structure quasiment homogène. En même temps l'amidon a gélatinisé car la température de friture (170°C) est bien au-delà de la température de gélatinisation (86°C) de l'amidon contenu dans la banane plantain. Pendant la friture, une quantité d'eau s'évapore du produit et ce dernier a tendance à rétrécir. L'amidon gélatiné, gonfle pour essayer de remédier à la perte de son intégrité cellulaire. Dans certaines cellules l'huile prend la place de l'eau, représentée sur les images par les zones sombres.

5.7 DESCRIPTION DU TRANSFERT DE MASSE AU COURS DE LA FRITURE PROFONDE

5.7.1 Evaluation de la cinétique de perte de masse de la banane plantain au cours de la friture

La **figure 5-29** présente les résultats obtenus de la perte de masse de banane plantain (180g) et la quantité d'eau évaporée au cours de la friture dans les conditions optimales. La perte de masse a été obtenue par pesée sur une balance avant et après friture du panier métallique contenant les échantillons de plantain. La quantité d'eau vaporisée a été calculée par différence massique. Pendant que la masse de plantain diminue, la quantité d'eau vaporisée augmente au cours de la friture. Cette courbe ressemble à une courbe de séchage et montre une élimination de l'eau maximale pendant les 30 premières secondes, et devient minime au cours du procédé de friture. Nous remarquons que sur la figure, la quantité vaporisée à la fin de la friture est d'environ 20%.

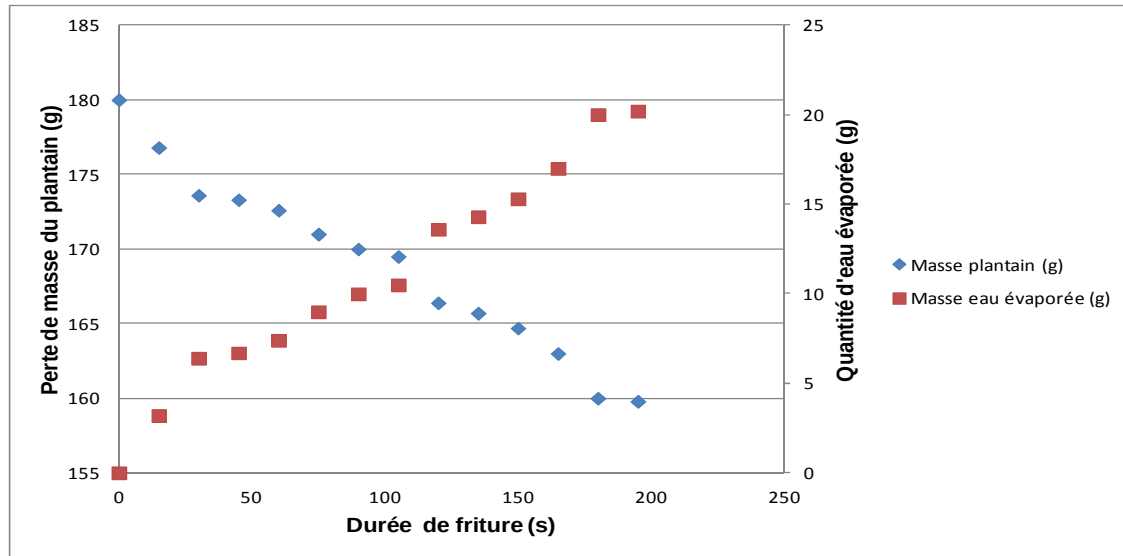


Figure 5-29 : Courbe de pertes de masse de banane plantain et d'eau évaporée

Les valeurs initiales et finales de ces mesures à trois temps de friture sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 5-21 : Teneur en eau et perte de masse initiales et finales de la banane plantain au cours de la friture

Temps de friture (s)	Masse finale plantain (m f)	Masse eau évaporée (g)
0	180	0
60	172,6	7,4
120	166,4	13,6
195	159,8	20,2

5.7.2 Modélisation de la cinétique de perte en eau et gain d'huile de la banane plantain dans les conditions contrôlées (température et épaisseur)

La friture, procédé ancien de préparation des aliments, est considérée comme une méthode de déshydratation partielle (Adedeji *et al.*, 2009) ou totale. Cette déshydratation a lieu grâce aux transferts de masse (perte d'eau) et d'énergie (apport de chaleur) qui se font

simultanément au moment de la friture (Krokida *et al.*, 2000b ; Farinu et Baik, 2008 ; Debnath *et al.*, 2009). Le transfert de masse est caractérisé par deux phénomènes évoqués par de nombreux auteurs (Dobraszczyk *et al.*, 2006 ; Gazmuri et Bouchon, 2009 ; Adedeji *et al.*, 2009). Il s'agit de la perte en eau contenue dans les aliments et l'absorption de l'huile dans ceux-ci. Très souvent, ces deux transferts de masse sont corrélés (Gamble et Rice, 1988 ; Vitrac *et al.*, 2002 ; Adedeji *et al.*, 2009) et présentent une bonne corrélation. Des études ont déjà été réalisées sur le plantain vert et mature (Totte *et al.*, 1996 ; Lemaire *et al.*, 1997 ; Diaz *et al.*, 1999).

La friture profonde réalisée à des températures élevées comprises entre 160 et 180°C, occasionne un violent mouvement caractérisé par un échange entre la matrice et le bain de friture. La **figure 5-30** présentant la coupe transversale d'une tranche de banane plantain lors de la friture, nous donne une estimation du phénomène qui se produit.

La chaleur du bain d'huile apportée par la friteuse est véhiculée vers les tranches de banane plantain par convection et conduction respectivement à la surface et à l'intérieur du produit. Cette chaleur apportée sous forme d'énergie est responsable de l'élimination de l'eau sous forme de vapeur qui se traduit par des bouillonnements autour de l'aliment. Ceci entraîne une absorption d'huile dans les pores laissés libres par le départ de l'eau, pouvant aller de 35 à 40% (Duran *et al.*, 2007 ; Debnath *et al.*, 2009), de 45% (Saguy et Pinthus, 1995 ; Funami *et al.*, 1999), et enfin de 50% du poids total (Pinthus *et al.*, 1993 ; Sothornvit, 2011).

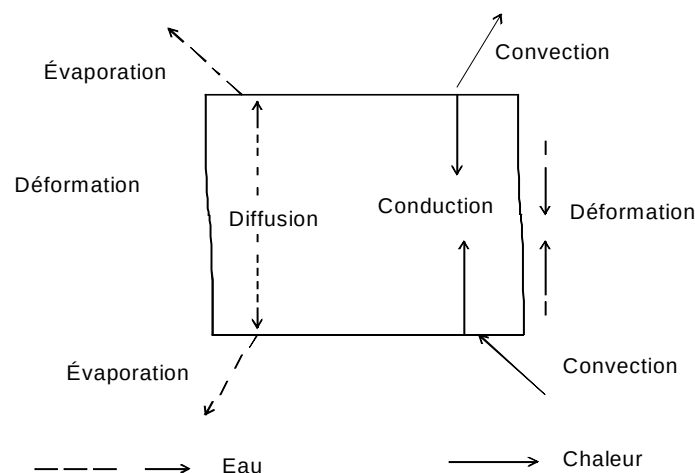


Figure 5-30 : Mécanismes de transfert de chaleur et de matière lors de la friture de la banane plantain.

Les modélisations de la perte en eau et de l'absorption d'huile au cours du procédé de friture ont été réalisées avec un modèle mathématique du premier ordre décrit par Krokida et ses collaborateurs (2000b). Plusieurs hypothèses ont été émises afin de décrire le phénomène :

- (1) La tranche de banane plantain est considérée comme étant un système homogène, isotrope et isotherme.
- (2) La distribution de la teneur en eau et de la température initiale est uniforme dans toutes les tranches.
- (3) Le niveau de l'huile et sa température sont considérés constants avec un ratio substrat / huile de 1 : 10 (g/g) (180g / 2000mL).
- (4) Les dynamiques de perte en eau et gain en huile sont considérées comme étant indépendantes et d'ordre 1.
- (5) La quantité d'énergie dégagée, nécessaire pour permettre les réactions chimiques dans l'aliment, est négligeable devant celle requise pour la vaporisation de l'eau.
- (6) La formation de la croûte est considérée comme négligeable.
- (7) L'eau et l'huile migrent par diffusion. Le transfert de masse se fait dans un sens unidirectionnel.
- (8) L'influence de la nature de l'huile est négligeable.

En se basant sur toutes ces hypothèses émises, des modèles mathématiques ont été développés. L'huile Frial sera utilisée comme huile de référence.

5.7.2.1 Perte en eau

Après la série de fritures, 25 grammes d'échantillons de banane plantain sont placés dans des pots en plastique préalablement pesés que l'on ferme hermétiquement, lesquels sont congelés à -30°C pendant 2 jours. Ces échantillons sont ensuite lyophilisés (lyophilisateur Christ) pendant 72 heures afin de s'assurer de l'élimination de l'eau résiduelle.

Modèle mathématique pour optimiser la perte en eau

$$d(X)/dt = -K_X (X - X_e) \quad \text{Équation 5-1}$$

Où X_e est la teneur en eau à l'équilibre thermodynamique (g d'eau / g de matière).

Une fois l'équation (1) intégrée, elle donne lieu à la suivante :

$$(X - X_e) / (X_0 - X_e) = \exp(-K_x t) \quad \text{Équation 5-2}$$

Où la teneur en eau à la température initiale de friture (t initial) est notée X_0 , k_x (min^{-1}) la constante de vitesse de la perte en eau.

Les termes K_x et X_e ont été calculés à partir de deux équations différentes (dont l'une est empirique) afin d'étudier l'influence des trois variables choisies sur le phénomène de transfert de matière sur le plantain.

Pour le cas de K_x , nous avons utilisé l'équation empirique proposée par Krokida et *al.*, 2000b avec une faible modification :

$$K_x = K_{0x} \left[\frac{T}{170} \right]^{K_{xt}} \left[\frac{d}{10} \right]^{K_{xd}} \left[\frac{C}{100} \right]^{K_{xc}} \quad \text{Équation 5-3}$$

$$X_e = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2$$

Équation 5-4

Avec

$$X_1 = (d - 10)/5 \quad \text{Équation 5-5}$$

$$X_2 = (T - 170)/20 \quad \text{Équation 5-6}$$

$$a_0 = 51,2244 ; a_1 = 3,30822 \text{ et } a_2 = -2,07846$$

Où T ($^{\circ}\text{C}$) représente la température de friture, d l'épaisseur de la tranche de banane plantain et C le pourcentage de la concentration en acides gras insaturés. Les constantes a_0 , a_1 et a_2 seront utilisées pour le calcul de la valeur de la teneur en eau à l'équilibre thermodynamique X_e .

Les paramètres de ces équations (K_{0x} , K_{xt} , K_{xd} et K_{xc}) ont été obtenus en utilisant la méthode de régression non linéaire. Les coefficients attribués à ces paramètres sont résumés dans le **tableau 5-23**.

Modélisation de la perte en eau

L'analyse de la teneur en eau, mesurée après différentes conditions de friture, a montré une variation remarquable en fonction de la température, du bain et de l'épaisseur de la banane plantain. (Guillaumin, 1988 ; Krokida *et al.*, 2000a). Le **tableau 5-22** résume les réponses initiales et finales obtenues lors des observations expérimentales et prédites. Globalement, la teneur en eau initiale est de 65% puis décroît progressivement au cours du temps en fonction de l'épaisseur et de la température de friture imposées.

Les **figures 5-31** (a, b et c) présentent les courbes obtenues à partir des réponses expérimentales et prédites. Les courbes discontinues sont celles obtenues expérimentalement (moyenne de trois répétitions), tandis que celles qui sont sous forme continue sont celles qui ont été calculées. Ces figures ont une allure pratiquement similaire et présentent une perte significative de l'eau, dès les premières secondes de friture. Ce phénomène peut être dû à la vaporisation de l'eau superficielle des échantillons comme le mentionnent certains auteurs (Ngadi, *et al.*, 2007 ; Ngadi, *et al.*, 2009 ; Mariscal et Bouchon, 2008 ; Adedeji *et al.*, 2009). L'utilisation de trois températures différentes nous montre que la température a une influence négative sur la teneur en eau. Le phénomène de séchage par friture reste le même, mais la vitesse de perte en eau diffère tout comme la quantité d'eau évaporée. Cela a été confirmé par les valeurs présentées dans le **tableau 5-22**.

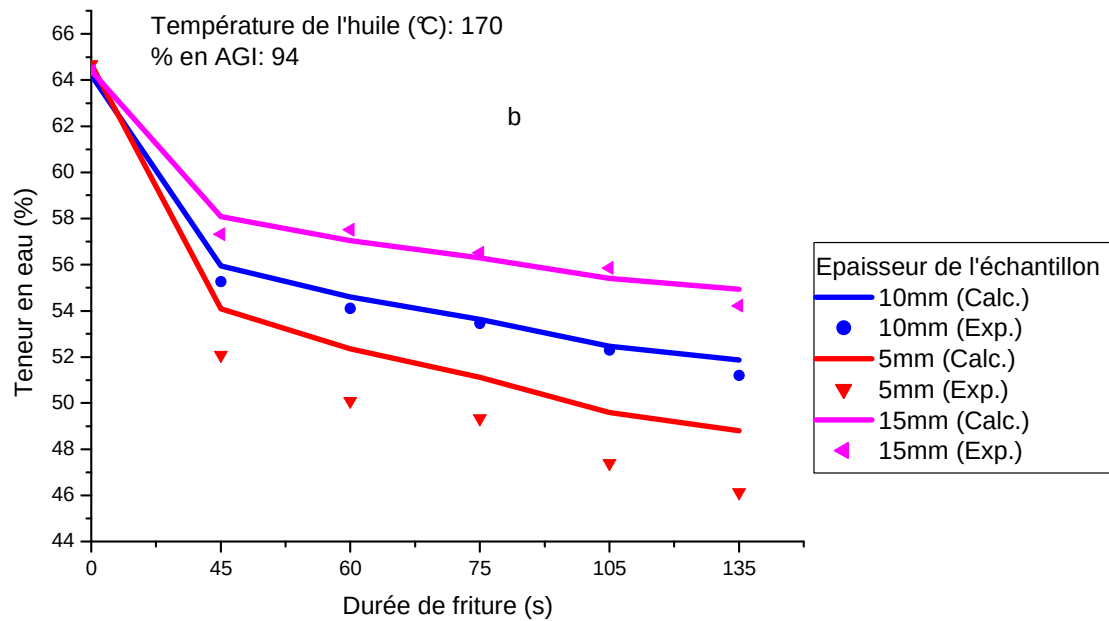
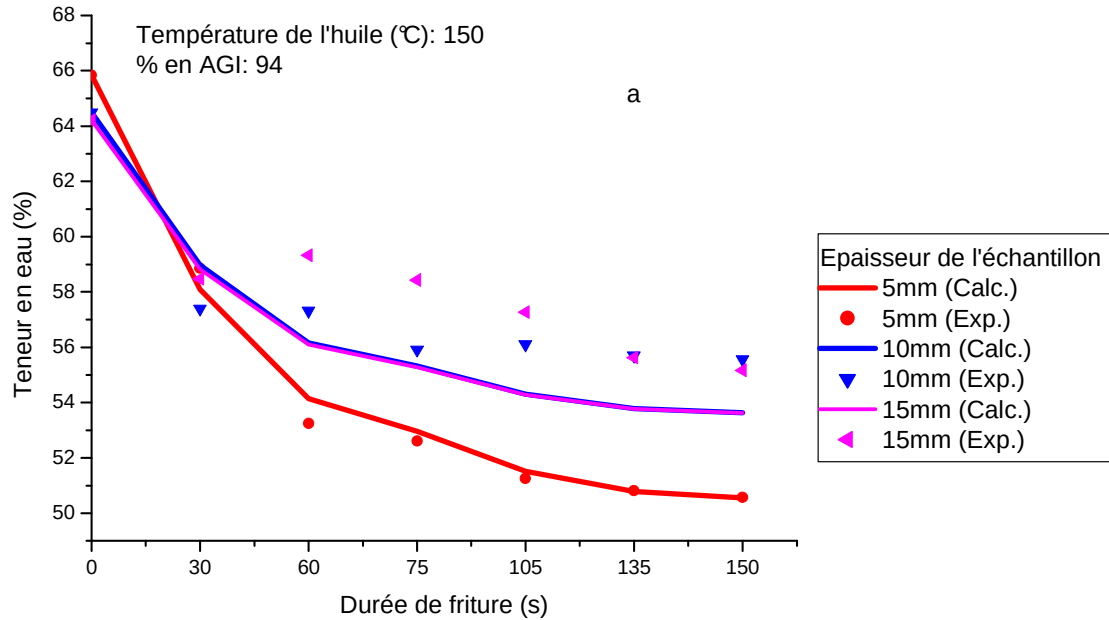
L'épaisseur de la banane plantain nous a également montré qu'elle a un effet significatif sur la perte en eau, quelque soit la température utilisée. Les pertes en eau sont plus élevées pour les faibles épaisseurs. La déshydratation a donc été observée (qui correspondent au maximum d'eau vaporisée ou l'équilibre thermodynamique de l'eau) lors de la friture de la banane plantain de 5 mm d'épaisseur et à 190°C ($34,87 \pm 1,09\%$) comparé à 170°C ($42,13 \pm 1,07\%$) et 150°C ($47,28 \pm 1,13\%$).

Tableau 5-22 : Pourcentage des teneurs en huile (en base sèche) expérimentales et calculées au cours de la cinétique de friture

Temps (s)	Epaisseur (mm)	150°C			170°C			190°C		
		Y _{exp}	Y _{calc}	ΔTE	Y _{exp}	Y _{calc}	ΔTE	Y _{exp}	Y _{calc}	ΔTE
0	5	65,84	65,84	0	64,69	64,69	0	65,34	65,34	0
195		47,28	50,21	-2,93	42,13	48,21	-6,08	34,87	46,24	-11,37
0	10	64,49	64,49	0	64,21	64,21	0	64,59	65,59	0
195		54,54	53,38	1,16	49,81	51,39	-1,58	48,66	49,41	-0,76
0	15	64,21	64,21	0	64,41	64,41	0	65,29	65,29	0
195		55,02	53,38	1,64	53,30	54,58	-1,28	47,26	52,61	-5,35

Y_{exp} : réponse expérimentale (%); Y_{calc} : réponse calculée (%); ΔTH : écart type entre la valeur calculée et expérimentale

Les résultats expérimentaux ont bien montré que la teneur en eau dépend de deux facteurs principaux. Il s'agit de la température et de l'épaisseur de l'échantillon. Ceci nous a conduit à définir une équation fonction des deux facteurs avec trois constantes a_0 , a_1 et a_2 afin de calculer la valeur de la teneur en eau, à l'équilibre thermodynamique.



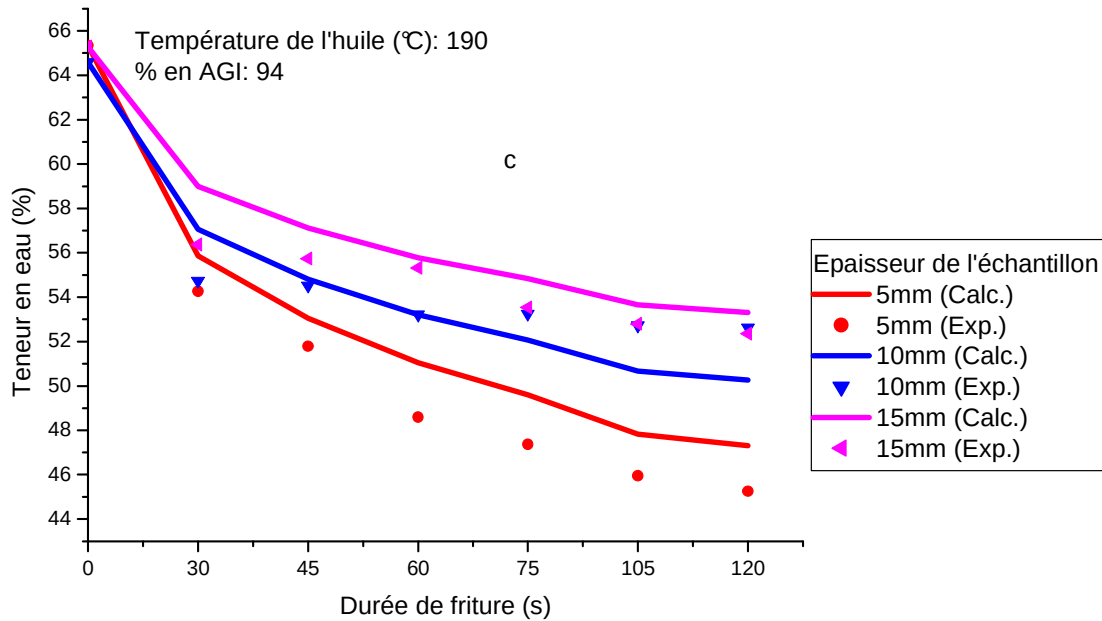


Figure 5-31 : Courbes (a, b et c) de cinétiques de perte en eau avec simulations pour différents modes de traitement.

En observant ces courbes théoriques, nous constatons qu'elles ressemblent aux courbes de séchage avec une perte énorme dès les 10 à 20 premières secondes. Ces mêmes figures présentent un bon accord entre les valeurs calculées et la moyenne des valeurs expérimentales.

5.7.2.2 Gain d'huile

La teneur en huile a été déterminée comme mentionné dans le chapitre 4.2.1.2.

Pour réaliser la modélisation sur l'absorption d'huile par la matrice au cours du procédé de friture profonde, nous avons utilisé la même équation empirique du premier ordre du modèle mathématique proposé par (Krokida *et al.*, 2000a, b) qui se présente comme suit :

$$d(Y)/dt = -K_Y (Y - Y_e) \quad \text{Équation 5-7}$$

Où Y_e est la teneur en huile à l'équilibre thermodynamique (g d'eau / g de matière).

A la différence avec la perte en TE, la quantité d'huile est nulle, à la température initiale de friture (t_{initial}). Ceci conduit après intégration de l'équation (4) à l'obtention d'une nouvelle équation :

$$Y = Y_e [1 - \exp(-K_Y t)] \quad \text{Équation 5-8}$$

K_Y (min^{-1}) étant la constante de vitesse de l'absorption d'huile.

Des équations empiriques proposées par Krokida *et al.*, 2000a ; 2000b avec une faible modification ont été utilisées pour étudier l'influence des trois variables choisies sur le phénomène de transfert de masse sur le plantain. Elles se présentent comme suit :

$$K_Y = K_{0Y} \left[\frac{T}{170} \right]^{K_{YT}} \left[\frac{d}{10} \right]^{K_{Yd}} \left[\frac{C}{100} \right]^{K_{YC}} \quad \text{Équation 5-9}$$

$$Y_e = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2$$

$$\text{Équation 5-10}$$

Avec $a_0 = 15,45$; $a_1 = -5,65$; et $a_2 = 2,6$

Où X_1 et X_2 sont calculées comme le montre les **équations 5-5** et **5-6**.

T ($^{\circ}\text{C}$) représente la température de friture, d l'épaisseur de la tranche de banane plantain et C le pourcentage de la concentration en acides gras insaturés. Les constantes a_0 , a_1 et a_2 seront utilisées pour le calcul de la valeur de la teneur en huile à l'équilibre thermodynamique Y_e .

Les sept paramètres des **équations 5-9** et **5-10** (K_{0Y} , K_{YT} , K_{Yd} et K_{YC}) ont été obtenus en utilisant la méthode de régression non linéaire lors d'un premier essai d'analyse sur la perte en eau et l'absorption d'huile dans les conditions de friture optimales de la banane plantain. Les coefficients attribués à ces paramètres (pour toutes les conditions) sont résumés dans le **tableau 5-23**.

Tableau 5-23 : Estimation des coefficients des paramètres des équations empiriques

Conditions de friture	K_x	X_e	K_y	Y_e
150°C/5mm/180g	0,02240192	49,99464	0,01907889	18,5
150°C/10mm/180g	0,02246412	53,30286	0,01913186	12,85
150°C/15mm/180g	0,02250058	56,61108	0,01916291	7,2
170°C/5mm/180g	0,02240012	47,91618	0,01907736	21,1
170°C/10mm/180g	0,02246231	51,2244	0,01913033	15,45
170°C/15mm/180g	0,02249877	54,53262	0,01916138	9,8
190°C/5mm/180g	0,2239852	45,83772	0,019076	23,7
190°C/10mm/180g	0,02246071	49,14594	0,01912897	18,05
190°C/15mm/180g	0,2249717	52,45416	0,01916001	12,4

Modélisation du phénomène d'absorption de l'huile : discussion

L'absorption de l'huile au cours de la friture profonde reste jusqu'à présent un phénomène complexe, contradictoire et difficile à expliquer. De nombreux auteurs (Ufheil et Escher, 1996 ; Moreira *et al.*, 1997 ; Moreira et Barrufet, 1998 ; Krokida *et al.*, 2000b ; Garayo et Moreira, 2002 ; Bouchon *et al.*, 2003) ont précisé qu'au moment du retrait des aliments de la friteuse, l'absorption d'huile est plus accentuée et serait de ce fait qualifiée de phénomène de surface (Mellema, 2003 ; Duran *et al.*, 2007 ; Troncoso et Pedreschi, 2009). Sachant que la quantité de l'huile dépend de la teneur en eau initiale et vaporisée, celle-ci augmente en fonction de la température et de l'épaisseur dans cette étude (où quelques données sont présentées dans le **tableau 5-24**). Les courbes obtenues ont toutes une allure exponentielle et on constate que la banane plantain frite à la température de 190°C présente des quantités plus élevée en huile, quelque soit l'épaisseur du produit. Pour une épaisseur de 10 mm, la teneur en huile est de $12,10 \pm 1,04\%$ (150°C), de $12,18 \pm 1,08\%$ (170°C) et enfin de $19,12 \pm 1,56\%$ (190°C). Nos résultats ne confirment pas ceux obtenus par Dana et Saguy,

2006 ; Troncoso et Pedreschi, 2009 ; Dehghan Nasiri *et al.*, 2011; qui indiquent que les températures élevées conduisent à une diminution de l'absorption de l'huile en raison de la formation de la croûte qui joue un rôle barrière. La faible formation de la croûte dans notre matrice pourrait expliquer nos résultats car la grande partie de l'huile se trouve être à la surface même de la matrice. Ceci nous conduit à penser que ce paramètre indique qu'il a un effet positif sur la teneur en huile.

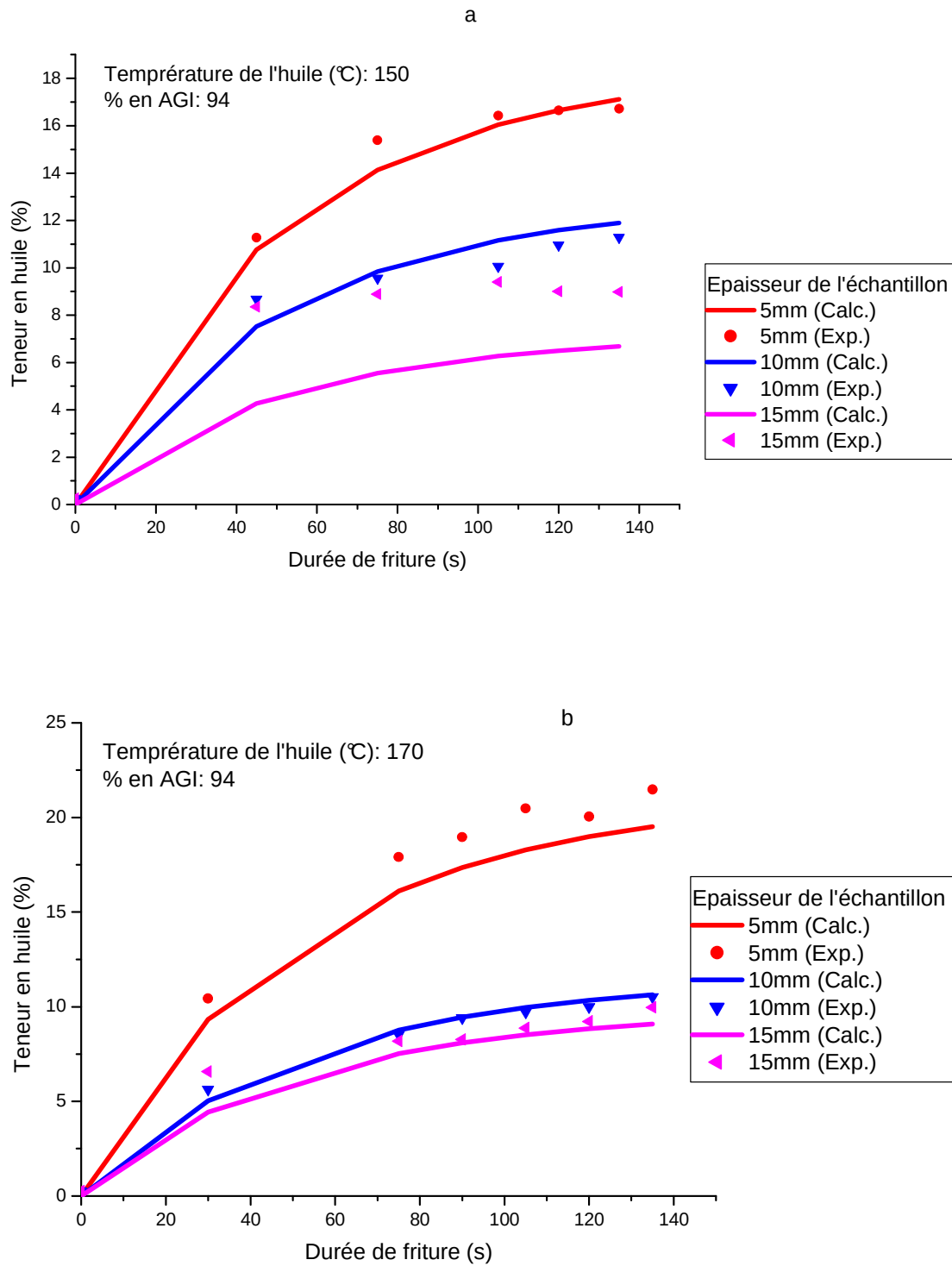
En se basant sur l'épaisseur des échantillons, on constate que la quantité d'huile absorbée est plus élevée pour de faibles épaisseurs. La plus grande absorption est observée pour des échantillons de banane de 5 mm d'épaisseur. Tous ces résultats sont illustrés dans la **figure 5-32** et prouvent que l'épaisseur a un effet significativement négatif sur la teneur en huile. A l'exemple de la friture réalisée à 170°C, les quantités absorbées par les disques de banane plantain sont de $24,53 \pm 0,53\%$ (pour 5 mm d'épaisseur), $12,18 \pm 1,08\%$ (pour 10 mm d'épaisseur) et enfin de $10,51 \pm 0,44\%$ (pour 15 mm d'épaisseur) à la fin de la friture.

Tableau 5-24 : Pourcentage des teneurs en huile expérimentales (sur base sèche) et calculées au cours de la cinétique de friture

Temps (s)	Epaisseur (mm)	150°C			170°C			190°C		
		Y _{exp}	Y _{calc}	ΔTH	Y _{exp}	Y _{calc}	ΔTH	Y _{exp}	Y _{calc}	ΔTH
0	5	0,25	0,00	0,25	0,25	0,00		0,25	0,00	0,26
195		20,37	18,06	2,31	24,53	20,59	3,94	33,01	23,13	9,88
0	10	0,25	0	0,25	0,26	0	0,26	0,25	0	0,25
195		12,10	12,55	-0,45	12,18	11,22	0,96	19,12	17,62	1,50
0	15	0,26	0,00	0,26	0,25	0,00	0,25	0,25	0,00	0,25
195		9,81	7,03	2,77	10,51	9,57	0,93	13,89	12,11	1,78

Y_{exp} : réponse expérimentale (%); Y_{calc} : réponse calculée (%); ΔTH : écart-type entre la valeur calculée et expérimentale.

Les résultats obtenus expérimentalement ont été modélisés suivant le modèle que nous avons défini et ont été présenté ensemble avec les données expérimentales sous forme de ligne continue sur la **figure 5-32**.



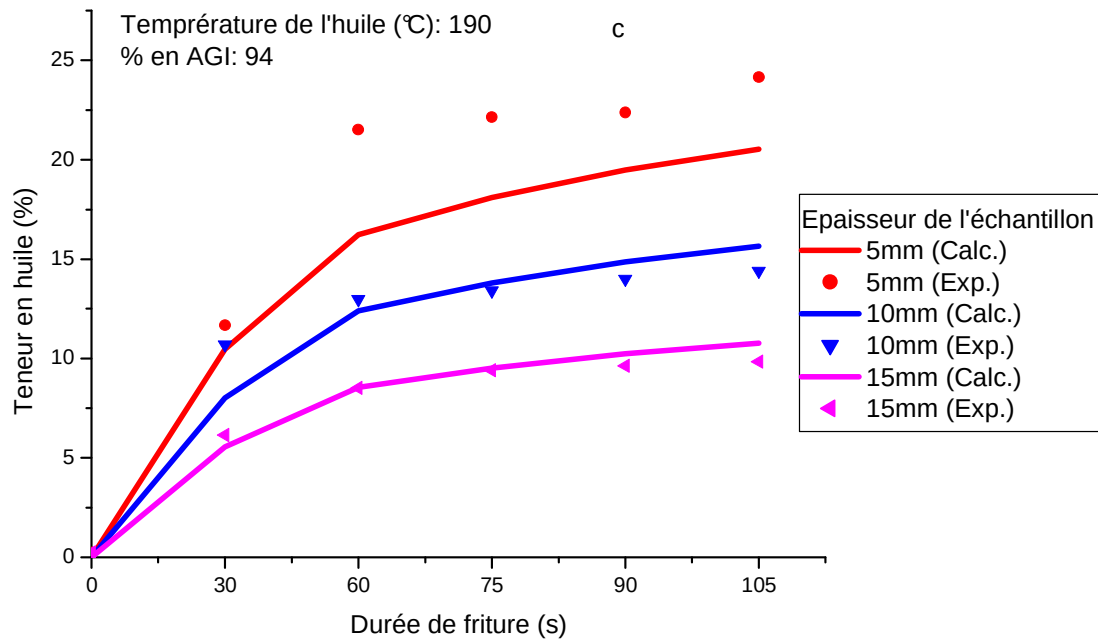


Figure 5-32 : Courbes (a, b et c) de cinétiques d'absorption d'huile avec les simulations pour différents modes de friture.

L'évolution des courbes montre dans la majorité un bon accord entre les valeurs calculées et la moyenne des valeurs expérimentales. Ceci confirme que le modèle proposé est adapté à l'étude. Les valeurs sont présentées dans le **tableau 5-24**.

En conclusion, l'étude des cinétiques de perte en eau et d'absorption d'huile nous a permis de vérifier les effets des variables (température et épaisseur) sur les deux phénomènes de transfert de masse. Les températures élevées conduisent à une plus grande perte en eau et donc à une teneur en huile plus élevée. L'épaisseur du produit est aussi d'une grande importance car il est bien connu que les produits de type « chips » se déshydratent rapidement et absorbent plus facilement une grande quantité d'huile, contrairement aux produits de type « frites ». Nos résultats vérifient ces hypothèses où pour toutes les températures de friture employées, le maximum de perte en eau et d'absorption d'huile est observé dans le cas de la plus faible épaisseur (5mm).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le procédé de friture profonde est un moyen de cuisson rapide des aliments largement utilisé pour la consommation des produits amylacés comme la banane plantain verte ou mûre. Découpée en dé, en cylindre ou en forme longitudinale, la banane plantain frite est consommée comme produit de grignotage ou comme accompagnement d'aliments dans de nombreux pays Africain et d'Amérique latine. Malgré les différentes transformations bénéfiques apportées par le procédé de friture (développement de la texture et de la saveur du produit), certaines altérations induites par le procédé de friture touchent à la fois la qualité du bain d'huile (phénomènes d'oxydation, développement de composés polaires) mais aussi le produit frit (augmentation de la quantité de lipides consommés).

Nous nous sommes intéressés au mode de cuisson de la banane plantain très répandu au Congo, pour essayer de maîtriser au mieux sa cuisson à un stade de maturité avancé (7), tout en contrôlant les paramètres physico-chimiques du bain de friture afin de limiter le développement des composés polaires.

Le premier objectif de ce travail, nous a conduit à optimiser les conditions de friture profonde en élaborant un plan d'expériences permettant de modéliser les paramètres (température, épaisseur et quantité de matière) sur la qualité finale du produit frit et la qualité du bain d'huile. L'utilisation de la méthodologie de surfaces de réponse a permis de quantifier à partir d'un modèle empirique quadratique, les effets de ces facteurs et leurs interactions sur la qualité finale de la banane plantain frite en termes de teneur en eau, teneur en huile, le profil textural et sa couleur. Le but principal de l'utilisation de la méthodologie des surfaces de réponse était d'optimiser les conditions de friture profonde en utilisant différentes huiles de friture utilisées au Congo, possédant un profil en acides gras différents, pour obtenir des tranches de banane plantain frites, avec une qualité finale acceptable.

En se basant sur les résultats expérimentaux, des conclusions générales peuvent être tirées : i) la perte en eau est fonction de la température et de la durée de friture; ii) le changement de couleur du plantain a augmenté avec l'augmentation de la température et de la durée de friture ; iii) la prise d'huile était fortement affectée par la durée de friture dans les deux cas étudiés ; iv) la dureté des tranches de plantain a changé considérablement en fonction des trois facteurs étudiés. Les coefficients de régression obtenus pour chaque réponse en fonction de la nature de l'huile utilisée, ont montré que la méthodologie des réponses de surface est une méthode fiable pour décrire les conditions optimales de la friture profonde.

L'application de la méthode de désirabilité nous a permis de mettre en place un ensemble de conditions optimales pour la température, le temps de cuisson et la quantité de plantain en fonction des huiles utilisées, pour obtenir les caractéristiques hédoniques souhaitées. Pour le cas de l'huile Frial, les conditions optimales sont les suivantes : température de friture : 170°C ; temps de friture : 3,15 min ; quantité de banane plantain : 180g et pour le cas l'huile de soja : température de friture : 170°C ; temps de friture : 3,00 minutes ; quantité de banane plantain : 180g.

Nous nous sommes ensuite focalisés sur la qualité des bains de friture profonde et de la « dégradabilité » des huiles, souvent utilisées très longtemps en raison de leur coût élevé.

Selon Frankel (1998), les réactions de dégradation comme les phénomènes d'oxydation lipidique sont des processus inévitables qui entraînent une altération des propriétés sensorielles (goût, odeur et couleur), nutritionnelles et physiques des aliments. Les hautes températures de friture et la composition des aliments utilisés entraînent le développement de ces réactions plus ou moins rapidement. Les bonnes pratiques de friture sont rarement respectées par les personnes qui pratiquent la friture au Congo à des fins commerciales. Certains ignorent les conséquences néfastes sur la santé qui s'en suivent lors de l'ingestion d'un aliment frit dans une huile altérée ou ce qu'une alimentation trop riche en lipides peut entraîner sur la santé. Les huiles de soja et de palme raffinée sont très utilisées pour réaliser tous les types de friture au Congo dans les ménages et à des fins commerciales.

Le deuxième objectif de ce travail a consisté à évaluer la durée de la stabilité de ces différentes huiles utilisées en Afrique avec pour référence l'utilisation d'une huile de friture stable « l'huile Frial » lors de la friture de la banane plantain, dans les conditions optimales déterminées au préalable, jusqu'à l'obtention des limites d'acceptabilité.

Les analyses portant sur la composition lipidique des bains de friture ont montré des différences de profils en acides gras en fonction de la nature des trois huiles utilisées. L'huile Frial peut être qualifiée d'«huile oléique» ($72,97 \pm 0,53\%$), l'huile de soja d'«huile linoléique» ($53,59 \pm 0,10\%$) et l'huile de palme raffinée d'«huile palmitique» ($41,28 \pm 0,09\%$) avec une fraction élevée en acide oléique ($42,45 \pm 0,14\%$). Les réactions chimiques qui ont lieu lors de la friture ont conduit au changement de la composition en acides gras dans les trois huiles. En termes d'altération de l'huile, le rapport entre l'acide linoléique et l'acide palmitique ($C18:2 / C16:0$), une des mesures indiquant le niveau de dégradation de l'huile, a faiblement baissé au cours de la friture dans les trois huiles (de $3,88 \pm 0,02\%$ à $3,32 \pm 0,037\%$, de $5,13 \pm 0,02\%$ à $4,63 \pm 0,01\%$ et de $0,26 \pm 0,01\%$ à $0,18 \pm 0,01\%$ respectivement pour l'huile Frial, l'huile de soja et enfin pour l'huile de palme oléique raffinée. Ces résultats montrent que les

huiles utilisées subissent des altérations au niveau de la structure des acides gras et notamment des doubles liaisons.

Les procédés de cuisson conduisent à un phénomène d'absorption de l'huile par les produits frits et cette dernière peut présenter des signes de dégradation. Ce transfert d'huile du bain de cuisson vers l'aliment ne peut avoir lieu qu'après expulsion d'une fraction de la teneur en eau de la banane par vaporisation sous l'effet de la température élevée. Ces réactions de transfert de matière sont très rapides et apparaissent au bout de quelques secondes de cuisson profonde. Elles sont d'autant plus accentuées lors de la sortie de l'aliment du bain de cuisson. Il se produit alors un refroidissement brutal qui entraîne une absorption de l'huile dans les pores et les canaux formés lors de l'expulsion de la vapeur d'eau. Il est ainsi possible d'observer une absorption entre 17 et 26% d'huile pour 100 g de banane plantain en fonction de la nature de l'huile et le nombre de jours d'utilisation du bain d'huile. Nous avons observé en moyenne que la teneur en eau résiduelle dans les tranches de banane plantain oscillait entre 50 et 54% (sur base humide).

L'évolution du comportement des huiles de friture a été étudiée au travers de leurs propriétés physico-chimiques. Le profil thermique obtenu par analyse thermique différentielle a révélé un déplacement du pic de cristallisation vers des températures inférieures avec une diminution systématique de l'enthalpie de cristallisation au cours de la friture, dû aux produits d'oxydation qui présentent un point de cristallisation plus faible. Pour exemple, l'évolution du pic enregistré dans le cas de l'huile de référence Frial subit une diminution de 3°C ($-50,15 \pm 0,21^\circ\text{C}$ à $-53,65 \pm 0,21^\circ\text{C}$) avec une chute d'enthalpie de $41,91 \pm 0,61\text{J/g}$ à $25,64 \pm 0,41\text{J/g}$.

Nous avons d'autre part étudié l'apparition des composés polaires au cours du procédé de friture profonde permettant de détecter le moment où l'huile n'est plus acceptable pour être consommée, en deçà des 25% autorisés par la législation. Différentes méthodes chimiques ont été utilisées en parallèle des mesures effectuées à l'aide de capteurs électroniques largement utilisés en restauration collective, pour évaluer la teneur en composés polaires formés. Nous avons pu mettre en évidence de très bonnes corrélations pour l'apparition de ces composés polaires entre la méthode chimique et les mesures réalisées par les capteurs électroniques, mais aussi avec différents paramètres physico-chimiques (viscosité, indices d'oxydation) en fonction de la quantité de banane plantain utilisée (entre 18 et 24 kg).

Les différents indices, permettant de suivre la stabilité des trois huiles de friture, ont d'autre part été mesurés au cours du vieillissement du bain de friture (indice de peroxydes, indice d'acide, indice d'iode, acides gras libres, indice de para-anisidine).

Afin d'apprécier visuellement l'état de cuisson de la banane plantain, les mesures de couleur des disques de banane plantain mais aussi des huiles des bains de friture ont été réalisées.

Sur le plan macroscopique, l'étude des modifications de la structure de l'amidon contenu dans les disques de banane plantain avant et après friture, a été réalisée. L'observation au microscope électronique à balayage laisse apparaître une modification des granules d'amidon natif ronds et ovales (coupe effectuée sur une tranche fraîche). Il se forme après friture, des ruptures au niveau des parois cellulaires modifiant ainsi l'intégrité cellulaire des parois ainsi qu'une gélatinisation de l'amidon.

Au cours du procédé de friture profonde, des transferts de matière et de chaleur ont lieu. Ce transfert de masse est représenté par une diminution de la teneur en eau et l'absorption de l'huile. Dans la troisième partie de ce travail, nous avons mesuré les cinétiques de perte en eau et la quantité d'huile absorbée en fonction du temps de friture, de la nature de l'huile et des paramètres de friture (température, épaisseur et pourcentage en AGI intervenant dans le procédé de friture profonde). Nous avons élaboré un modèle mathématique empirique concernant la cinétique du premier ordre pour simuler les transferts de matière. Les observations expérimentales et modélisées ont montré que la perte en eau et le gain d'huile au cours de la friture augmente avec la température de friture et la diminution de l'épaisseur du plantain. Elles montrent également l'effet significatif des deux facteurs «température» et «épaisseur» sur les deux transferts de masse. Cependant ce modèle reste à affiner en prenant en compte plus de paramètres inhérents au système (épaisseur de la banane, température de friture) afin d'obtenir des produits moins gras à la sortie du bain de friture.

Une des perspectives de ce travail serait de poursuivre cette étude au Congo par une démarche sur le terrain et comparer les résultats obtenus avec les pratiques traditionnelles tout en respectant les conditions de friture. En effet, un travail d'information sur les dangers d'utiliser une huile de friture trop riche en composés polaires, voire oxydée, est à entreprendre.

Dans une démarche de santé publique, nous souhaiterions proposer un projet de campagne d'information au ministère de la santé et de la population (service d'hygiène), afin d'informer la population sur les risques à être exposés à l'ingestion répétée d'aliments frits dans une huile altérée. Il serait également intéressant d'opter pour un auto-contrôle régulier, en incitant les petits et grands restaurateurs, à vérifier la qualité des huiles commerciales par les moyens simples (couleur, viscosité, point de fumé, rancissement de l'huile). Ce travail pourrait aussi être mené dans le cas de la friture à usage domestique.

Une autre perspective consisterait à formuler une huile résistante à l'oxydation à partir des huiles largement consommées au Congo avec ajout d'antioxydants, tout en essayant de se rapprocher des caractéristiques de l'huile Frial (huile de référence utilisée dans cette étude).

Sur le plan nutritionnel et de la santé publique, il serait intéressant d'étudier la formation des composés néoformés lors du procédé de friture comme par exemple l'apparition d'acrylamide, la nature des différentes classes de composés polaires, les familles d'aldéhydes insaturés, entre autres. Nous pourrions également orienter notre recherche vers l'utilisation d'un enrobage issu de bio-polymères naturels d'origine végétale, avec comme stratégie une réduction de la teneur en lipides des produits frits.

Aujourd'hui, l'utilisation des biocarburants devient une réalité et il serait très intéressant de se préoccuper du devenir de ces huiles usagées. Une collecte organisée permettrait de valoriser ces huiles usagées pour la production de biocarburants et biolubrifiants et éviter de ce fait, leurs éliminations directes dans le sol ou dans les canalisations des eaux usées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

7 REFERENCES BIBLIORAPHIQUES

- A, Totte. (1994). Contribution a la valorisation des fruits tropicaux par friture. Cas de la banane plantain.
- Abdel-Aal, M. H., et Karara, H. A. (1986). Changes in corn oil during deep fat frying of foods. *Lebensmittel-Wissenschaft+ Technologie*, 19(4), 323–327.
- Abdulkarim, S. M., Long, K., Lai, O. M., Muhammad, S. K. S., et Ghazali, H. M. (2007). Frying quality and stability of high-oleic Moringa oleifera seed oil in comparison with other vegetable oils. *Food Chemistry*, 105(4), 1382-1389.
- Achir, N., Vitrac, O., et Trystram, G. (2008). Simulation and ability to control the surface thermal history and reactions during deep fat frying. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(11), 1953-1967.
- Ackman, R. G. (1998). Remarks on official methods employing boron trifluoride in the preparation of methyl esters of the fatty acids of fish oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 75(4), 541–545.
- Adam, K. L. (2005). La production biologique de la patate douce.
- Adedeji, A. A., Ngadi, M. O., et Raghavan, G. S. V. (2009). Kinetics of mass transfer in microwave precooked and deep-fat fried chicken nuggets. *Journal of Food Engineering*, 91(1), 146-153.
- Adler-Nissen, J. (1986). Enzymic hydrolysis of food proteins., xxiv + 427pp.
- Aguilera, J. M., et Gloria-Hernandez, H. (2000). Oil absorption during frying of frozen parfried potatoes. *Journal of Food Science*, 65(3), 476–479.
- Akdeniz, N., Sahin, S., et Sumnu, G. (2006). Functionality of batters containing different gums for deep-fat frying of carrot slices. *Journal of Food Engineering*, 75(4), 522-526.
- Al-Khusaibi, M., Gordon, M. H., Lovegrove, J. A., et Niranjan, K. (2012). Frying of potato chips in a blend of canola oil and palm olein: changes in levels of individual fatty acids and tocopherols. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(8), 1701-1709.
- Aladedunye, F., Catel, Y., et Przybylski, R. (2012). Novel caffeic acid amide antioxidants: Synthesis, radical scavenging activity and performance under storage and frying conditions. *Food Chemistry*, 130(4), 945-952.

- Aladedunye, F., et Matthäus, B. (2014). Phenolic extracts from *Sorbus aucuparia* (L.) and *Malus baccata* (L.) berries: Antioxidant activity and performance in rapeseed oil during frying and storage. *Food Chemistry*, 159, 273-281.
- Aladedunye, F., et Przybylski, R. (2013). Frying stability of high oleic sunflower oils as affected by composition of tocopherol isomers and linoleic acid content. *Food Chemistry*, 141(3), 2373-2378.
- Aladedunye, F., et Przybylski, R. (2014). Phosphatidylcholine and dihydrocaffeic acid amide mixture enhanced the thermo-oxidative stability of canola oil. *Food Chemistry*, 150, 494-499.
- Albert, S., et Mittel, G. S. (2002). Comparative evaluation of edible coatings to reduce fat uptake in a deep-fried cereal product. *Food Research International*, 35(5), 445-458.
- Alim, H., et Morton, I. D. (1974). Deep Fat Frying oil and absorption by a fried product. In *Journal of the Science of Food and Agriculture* (Vol. 25, p. 1041–1042). JOHN WILEY & SONS LTD BAFFINS LANE CHICHESTER, W SUSSEX, ENGLAND PO19 1UD.
- Alvis, A., Velez, C., Rada-Mendoza, M., Villamiel, M., & Villada, H. S. (2009). Heat transfer coefficient during deep-fat frying. *Food Control*, 20(4), 321-325.
- Andersson, A., Gekas, V., Lind, I., Oliveira, F., Öste, R., & Aguilfra, J. M. (1994). Effect of preheating on potato texture. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 34(3), 229–251.
- Andrikopoulos, N. K., Boskou, G., Dedoussis, G. V. Z., Chiou, A., Tzamtzis, V. A., & Papathanasiou, A. (2003). Quality assessment of frying oils and fats from 63 restaurants in Athens, Greece. *Food Service Technology*, 3(2), 49–59.
- Anese, M., Quarta, B., & Frias, J. (2011). Modelling the effect of asparaginase in reducing acrylamide formation in biscuits. *Food Chemistry*, 126(2), 435-440.
- Annapure, U. S., Singhal, R. S., & Kulkarni, P. R. (1999). Screening of hydrocolloids for reduction in oil uptake of a model deep fat fried product. *Lipid/Fett*, 101(6), 217–221.
- AOAC. (1990). *Official methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists Inc. I
- AOAC. (1995). *Official methods of analysis. Vol. I. 16th ed.* AOAC, Washington, DC, Association of Official Agricultural chemists.

- AOAC. (1997). Official methods of analysis. Vol. I. 17th ed. AOAC, Washington, DC, Association of Official Agricultural chemists.
- AOAC. (2011). The total starch assay procedure. *Official Method 996.11*, Association of Official Agricultural chemists.
- AOCS. (1998). *Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society*. AOCS.
- AOCS, A. O. C. (1989). *Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society* (Vol. 5). AOCS Champaign, IL,, US.
- Arce, J. A., & Fan, L. L. (1986). *Pretreatment of fried food products with oil containing emulsifiers*. Google Patents.
- Arias-Mendez, A., Warning, A., Datta, A. K., & Balsa-Canto, E. (2013). Quality and safety driven optimal operation of deep-fat frying of potato chips. *Journal of Food Engineering*, 119(1), 125-134.
- Ashkenazi, N., Mizrahi, S., & Berk, Z. (1984). Heat and mass transfer in frying. *Engineering and Food*, 1, 109–116.
- Assemand, E., Camara, F., Kouamé, F., Konan, V., Kouamé, J. D., & Kouamé, L. P. (2012). Caractérisation biochimique des fruits de plantain (*Musa paradisiaca* L.) variété « Agnrin » de Côte d'Ivoire et évaluation sensorielle de ses produits dérivés. *Journal of Applied Biosciences*, 60, 4438– 4447.
- Ateba, P., & Mittal, G. S. (1994). Modelling the deep-fat frying of beef meatballs. *International Journal of Food Science & Technology*, 29(4), 429–440.
- Aurore, G., Parfait, B., & Fahrasmane, L. (2009). Bananas, raw materials for making processed food products. *Trends in Food Science & Technology*, 20(2), 78-91.
- Baik, O.-D., & Mittal, G. S. (2002). Heat transfer coefficients during deep-fat frying of a tofu disc. *Transactions of the ASAE*, 45(5), 1493–1499.
- Baik, O.-D., & Mittal, G. S. (2005). Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying. *Food Research International*, 38(2), 183-191.
- Bajaj, I., & Singhal, R. (2007). Gellan gum for reducing oil uptake in sev, a legume based product during deep-fat frying. *Food Chemistry*, 104(4), 1472-1477.
- Bakry, F., Carreel, F., Caruana, M. L., Cote, F., Jenny, C., & Montcel, H. T. D. (1997). Les bananiers. In *L'amélioration des plantes tropicales / Charrier Andre (ed.)*, Jacquot

- Michel (ed.), Hamon Serge (ed.), Nicolas Dominique (ed.) (p. 109-139). Montpellier: CIRAD.
- Bansal, G., Zhou, W., Barlow, P. J., Joshi, P., Neo, F. L., & Lo, H. L. (2010). Evaluation of commercially available rapid test kits for the determination of oil quality in deep-frying operations. *Food Chemistry*, 121(2), 621-626.
- Bansal, G., Zhou, W., Barlow, P. J., Lo, H.-L., & Neo, F.-L. (2010). Performance of palm olein in repeated deep frying and controlled heating processes. *Food Chemistry*, 121(2), 338-347. doi:10.1016/j.foodchem.2009.12.034
- Bassama, J., Brat, P., Boulanger, R., Günata, Z., & Bohuon, P. (2012). Modeling deep-fat frying for control of acrylamide reaction in plantain. *Journal of Food Engineering*, 113(1), 156-166.
- Baumann, B., & Escher, F. (1995). Mass and Heat-Transfer During Deep-Fat Frying of Potato Slices .1. Rate. *Food Science and Technology-Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 28(4), 395-403.
- Baur, F. J. (1995). Analytical methods for oils and fats. In *Food oils and fats* (p. 281–309). Springer.
- Becalski, A., Lau, B. P.-Y., Lewis, D., & Seaman, S. W. (2003). Acrylamide in foods: occurrence, sources, and modeling. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(3), 802–808.
- Belbin, A. A. (1999). Use of colorimetry. *Spectral properties of lipids*, 368.
- Belhaj, N., Arab-Tehrany, E., & Linder, M. (2010). Oxidative kinetics of salmon oil in bulk and in nanoemulsion stabilized by marine lecithin. *Process Biochemistry*, 45(2), 187-195.
- Berasategi, I., Barriuso, B., Ansorena, D., & Astiasarán, I. (2012). Stability of avocado oil during heating: Comparative study to olive oil. *Food Chemistry*, 132(1), 439-446.
- Berdeaux, O., Fontagne, S., Semon, E., Velasco, J., Sebedio, J. L., & Dobarganes, C. (2012). A detailed identification study on high-temperature degradation products of oleic and linoleic acid methyl esters by GC-MS and GC-FTIR. *Chemistry and Physics of Lipids*, 165(3), 338-347.
- Besbes, S., Blecker, C., Deroanne, C., Lognay, G., Drira, N. E., & Attia, H. (2005). Heating effects on some quality characteristics of date seed oil. *Food Chemistry*, 91(3), 469-476.

- Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escaleira, L. A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5), 965-977.
- Bhattacharya, A. B., Sajilata, M. G., & Singhal, R. S. (2008). Lipid profile of foods fried in thermally polymerized palm oil. *Food Chemistry*, 109(4), 808-812.
- Bhattacharya, A. B., Sajilata, M. G., Tiwari, S. R., & Singhal, R. S. (2008). Regeneration of thermally polymerized frying oils with adsorbents. *Food Chemistry*, 110(3), 562-570.
- Biliaderis, C. G. (1991). The structure and interactions of starch with food constituents. *Canadian journal of physiology and pharmacology*, 69(1), 60-78.
- Billek, G., Guhr, G., & Waibel, J. (1978). Quality assessment of used frying fats: a comparison of four methods. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 55(10), 728-733.
- Blibech, M., Neifar, M., Kamoun, A., Ben Mbarek, B., & Ellouze-Ghorbel, R. (2013). Enhancing Potato Chips Quality by Optimizing Coating and Frying Conditions Using Response Surface Methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*.
- Blumenthal, M. M. (1991). A new look at the chemistry and physics of deep-fat frying. *Food technology (USA)*. Consulté à l'adresse <http://agris.fao.org/agrissearch/search.do?f=1991/US/US91315.xml;US9128450>
- Boon, P. E., de Mul, A., van der Voet, H., van Donkersgoed, G., Brette, M., & van Klaveren, J. D. (2005). Calculations of dietary exposure to acrylamide. *Mutation Research-Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 580(1-2), 143-155.
- Boskou, D., Blekas, G., & Tsimidou, M. (1996). Olive oil composition. *Olive oil: Chemistry and technology*, 1996, 52-83.
- Boskou, D., & Elmadfa, I. (1999). *Frying of food: Oxidation, nutrient and non-nutrient antioxidants, biologically active compounds and high temperatures*. CRC Press.
- Bouchon, P., Aguilera, J. M., & Pyle, D. L. (2003). Structure Oil-Absorption Relationships During Deep-Fat Frying. *Journal of Food Science*, 68(9), 2711-2716.
- Bouchon, P., Hollins, P., Pearson, M., Pyle, D. L., & Tobin, M. J. (2001). Oil distribution in fried potatoes monitored by infrared microspectroscopy. *Journal of Food Science*, 66(7), 918-923.
- Brady, C. J. (1987). Fruit ripening. *Annual review of plant physiology*, 38(1), 155-178.

- Browner, W. S., Westenhouse, J., & Tice, J. A. (1991). What if Americans ate less fat?: a quantitative estimate of the effect on mortality. *JAMA*, 265(24), 3285–3291.
- Budzaki, S., & Seruga, B. (2005). Determination of convective heat transfer coefficient during frying of potato dough. *Journal of Food Engineering*, 66(3), 307–314.
- Caponio, F., Gomes, T., Pasqualone, A., & Summo, C. (2007). Use of the high performance size exclusion chromatography analysis for the measurement of the degree of hydrolytic and oxidative degradation of the lipid fraction of biscuits. *Food Chemistry*, 102(1), 232–236.
- Caponio, F., Summo, C., Bilancia, M. T., Paradiso, V. M., Sikorska, E., & Gomes, T. (2011). High performance size-exclusion chromatography analysis of polar compounds applied to refined, mild deodorized, extra virgin olive oils and their blends: An approach to their differentiation. *Lwt-Food Science and Technology*, 44(8), 1726–1730.
- Chandler, S. (1995). The nutritional value of bananas. In S. Gowen (Éd.), *Bananas and Plantains* (p. 468–480). Springer Netherlands.
- Chang, H., & Chen, H. (2013). Association between textural profiles and surface electromyographic (sEMG) behaviors of microwavable cassava cuttlefish crackers with various expansion ratios. *Food Research International*, 53(1), 334–341.
- Chang, S. S., Peterson, R. J., & Ho, C.-T. (1978). Chemical reactions involved in the deep-fat frying of foods¹. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 55(10), 718–727.
- Chardigny, J.-M., & Malpuech-Brugere, C. (2007a). Acides gras trans et conjugués: origine et effets nutritionnels. *Nutrition clinique et métabolisme*, 21(1), 46–51.
- Chardigny, J.-M., & Malpuech-Brugere, C. (2007b). Trans and conjugated fatty acids: origins and nutritional effects. *Nutrition Clinique Et Metabolisme*, 21(1), 46–51.
- Chassagne-Berces, S., Poirier, C., Devaux, M.-F., Fonseca, F., Lahaye, M., Pigorini, G., Guillon, F. (2009). Changes in texture, cellular structure and cell wall composition in apple tissue as a result of freezing. *Food Research International*, 42(7), 788–797.
- Cheesman, E. E. (1947). Classification of the Bananas: The Genus *Musa* L. *Kew Bulletin*, 2(2), 106. doi:10.2307/4109207
- Cheftel, J.-C., & Cheftel, H. (1992). Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments.

- Chen, Y., & Moreira, R. G. (1997). Modelling of a batch deep-fat frying process for tortilla chips. *Food and Bioproducts Processing*, 75(C3), 181-190.
- Cheriot, S. (2007). *Rôle des produits de la réaction de Maillard dans l'inhibition de l'oxydation enzymatique des phénols et des lipides*. AgroParisTech.
- Chiavaro, E., Barnaba, C., Vittadini, E., Rodriguez-Estrada, M. T., Cerretani, L., & Bendini, A. (2009). Microwave heating of different commercial categories of olive oil: Part II. Effect on thermal properties. *Food Chemistry*, 115(4), 1393-1400.
- Chiou, A., Kalogeropoulos, N., Boskou, G., & Salta, F. N. (2012). Migration of health promoting microconstituents from frying vegetable oils to French fries. *Food Chemistry*, 133(4), 1255-1263.
- Chiou, A., Kalogeropoulos, N., Salta, F. N., Efstathiou, P., & Andrikopoulos, N. K. (2009). Pan-frying of French fries in three different edible oils enriched with olive leaf extract: Oxidative stability and fate of microconstituents. *Lwt-Food Science and Technology*, 42(6), 1090-1097.
- Choe, E., & Min, D. B. (2006). Mechanisms and factors for edible oil oxidation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 5(4), 169–186.
- Chotimarkorn, C., & Silalai, N. (2008). Addition of rice bran oil to soybean oil during frying increases the oxidative stability of the fried dough from rice flour during storage. *Food Research International*, 41(3), 308-317.
- Claeys, W. L., De Vleeschouwer, K., & Hendrickx, M. E. (2005). Quantifying the formation of carcinogens during food processing: acrylamide. *Trends in Food Science & Technology*, 16(5), 181-193.
- Claude, L. (2013). *Les lipides—nutrition et santé*. Lavoisier.
- Claus, A., Carle, R., & Schieber, A. (2008). Acrylamide in cereal products: A review. *Journal of Cereal Science*, 47(2), 118-133.
- Clodoveo, M. L., Delcuratolo, D., Gomes, T., & Colelli, G. (2007). Effect of different temperatures and storage atmospheres on Coratina olive oil quality. *Food Chemistry*, 102(3), 571-576.
- Colorimetry, C. I. E. (1986). Cie publication no. 15.2. *Commission Internationale de l'éclairage*, Vienna, 19–20.

- Combe, N., & Rossignol-Castera, A. (2010). Huiles végétales et friture. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 45(6, Supplement 1), S44-S51.
- Contamine, A.-C. (2008). Marchés de la pomme de terre dans l'Union européenne. *Cahiers Agricultures*, 17(4), 335–342.
- Coppin, E. A., & Pike, O. A. (2001). Oil stability index correlated with sensory determination of oxidative stability in light-exposed soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 78(1), 13–18.
- Cornell, J. A. (2011). *A primer on experiments with mixtures* (Vol. 854). Wiley. com.
- Cossut, J., Humbert, S., Defrenne, B., Roelstraete, L., Desmedt, C., Vanuxeem, M., Vidal, D. (2001). Les Corps Gras: Entre Tradition et Modernité.
- Costa Ferreira, S. L., Bruns, R. E., Paranhos da Silva, E. G., Lopes dos Santos, W. N., Quintella, C. M., David, J. M., Barros Neto, B. (2007). Statistical designs and response surface techniques for the optimization of chromatographic systems. *Journal of Chromatography A*, 1158(1-2), 2-14.
- Costa, R. M., Oliveira, F. A., & Gekas, V. (1997). Application of image analysis to the study of water losses from potato slices during frying. Consulté à l'adresse <http://repositorio.ucp.pt/handle/10400.14/5499>
- Costa, R. M., Oliveira, F. A. R., Delaney, O., & Gekas, V. (1999). Analysis of the heat transfer coefficient during potato frying. *Journal of Food Engineering*, 39(3), 293-299.
- Coughlin, J. R. (2003). Acrylamide: What we have learned so far. *Food Technology*, 57(2), 100-100.
- Courtois, F., Ziaïifar, A. M., Trezzani, I., & Trystram, G. (2012). Friture profonde : les interactions huile-produit. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 19(2), 89–95.
- Crank, J. (1975). The arithmetics of diffusion. *Oxford University Press, Oxford, UK*.
- Cuesta, C., Romero, A., & Sánchez-Muniz, F. J. (2001). Fatty acid changes in high oleic acid sunflower oil during successive deep-fat fryings of frozen foods. *Food science and technology international*, 7(4), 317–328.
- Da Silva, P. F., & Moreira, R. G. (2008). Vacuum frying of high-quality fruit and vegetable-based snacks. *LWT - Food Science and Technology*, 41(10), 1758-1767.

- Dana, D., & Saguy, I. S. (2006). Review: Mechanism of oil uptake during deep-fat frying and the surfactant effect-theory and myth. *Advances in Colloid and Interface Science*, 128, 267-272.
- Daniali, G., Jinap, S., Hanifah, N. L., & Hajeb, P. (2013). The effect of maturity stages of banana on the formation of acrylamide in banana fritters. *Food Control*, 32(2), 386-391.
- Debnath, S., Bhat, K. K., & Rastogi, N. K. (2003). Effect of pre-drying on kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of chickpea flour-based snack food. *Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie-Food Science and Technology*, 36(1), 91-98.
- Debnath, S., Rastogi, N. K., Gopala Krishna, A. G., & Lokesh, B. R. (2012). Effect of frying cycles on physical, chemical and heat transfer quality of rice bran oil during deep-fat frying of poori: An Indian traditional fried food. *Food and Bioproducts Processing*, 90(2), 249-256.
- Debnath, S., Rastogi, N. K., Krishna, A. G. G., & Lokesh, B. R. (2009). Oil partitioning between surface and structure of deep-fat fried potato slices: A kinetic study. *Lwt-Food Science and Technology*, 42(6), 1054-1058.
- Dehghan Nasiri, F., Mohebbi, M., Tabatabaee Yazdi, F., & Haddad Khodaparast, M. H. (2011). Kinetic modeling of mass transfer during deep fat frying of shrimp nugget prepared without a pre-frying step. *Food and Bioproducts Processing*, 89(3), 241-247.
- Del Castillo, M. D., Ames, J. M., & Gordon, M. H. (2002). Effect of roasting on the antioxidant activity of coffee brews. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(13),
- Delgado-Andrade, C., Seiquer, I., Haro, A., Castellano, R., & Pilar Navarro, M. (2010). Development of the Mail lard reaction in foods cooked by different techniques. Intake of Maillard-derived compounds. *Food Chemistry*, 122(1), 145-153.
- Diamante, L. M., Savage, G. P., & Vanhanen, L. (2012). Optimisation of vacuum frying of gold kiwifruit slices: application of response surface methodology. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(3), 518-524.
- Diamante, L. M., Savage, G. P., Vanhanen, L., & Ihns, R. (2012). Effects of maltodextrin level, frying temperature and time on the moisture, oil and beta-carotene contents of

- vacuum-fried apricot slices. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(2), 325-331.
- Diaz, A., Totte, A., Giroux, F., Reynes, M., & RaoultWack, A. L. (1996). Deep-fat frying of plantain (*Musa paradisiaca* L) .1. Characterization of control parameters. *Food Science and Technology-Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 29(5-6), 489-497.
- Diaz, A., Trystram, G., Vitrac, O., Dufour, D., & Raoult-Wack, A. L. (1999). Kinetics of moisture loss and fat absorption during frying for different varieties of plantain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(2), 291-299.
- Diaz Ortiz, A. (1997). Application de la friture à la valorisation de la banane plantain (*Musa paradisiaca* L.): contribution à la connaissance et à l'optimisation de l'opération unitaire de friture (Thèse de doctorat). École nationale supérieure des industries agricoles et alimentaires, Massy, Essonne, France.
- Dincer, I., & Yildiz, M. (1996). Modelling of thermal and moisture diffusions in cylindrically shaped sausages during frying. *Journal of Food Engineering*, 28(1), 35-44.
- Dobarganes, C. (1998). Formation, analysis of high molecular weight compounds in frying fats and oils. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 5(1), 41-7.
- Dobarganes, C., Márquez-Ruiz, G., & Velasco, J. (2000). Interactions between fat and food during deep-frying. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102(8-9), 521-528.
- Dobarganes, M. C., Marquez-Ruiz, G., & Erickson, M. D. (2006). Formation and analysis of oxidized monomeric, dimeric, and higher oligomeric triglycerides. *Deep frying: chemistry, nutrition, and practical applications*, (Ed. 2), 87-110.
- Dobarganes, M. C., Pérez-Camino, M. C., & Márquez-Ruiz, G. (1989). Determinación de compuestos polares en aceites y grasas de fritura. *Grasas y Aceites*, 40(1), 35-38.
- Dobarganes, M. C., Pérez-Camino, M. C., & Márquez-Ruiz, G. (1988). High Performance Size Exclusion Chromatography of Polar Compounds in Heated and Non-Heated Fats. *Lipid/Fett*, 90(8), 308-311.
- Dobarganes, M. C., Velasco, J., & Dieffenbacher, A. (2000). Determination of polar compounds, polymerized and oxidized triacylglycerols, and diacylglycerols in oils and

- fats - Results of collaborative studies and the standardized method (Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 72(8), 1563-1575.
- Dobraszczyk, B. J., Ainsworth, P., Ibanoglu, S., & Bouchon, P. (2006). Baking, extrusion and frying. *Food processing handbook*, 237–290.
- Doehlert, D. H. (1970). Uniform Shell Designs. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 19(3), 231-239.
- Dronne, Y., & Forslund, A. (2009). Le rôle croissant des huiles tropicales sur les marchés internationaux: principaux acteurs et produits. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 16(4), 184–192.
- Du Pont, M. S., Kirby, A. R., & Smith, A. C. (1992). Instrumental and sensory tests of texture of cooked frozen french fries. *International journal of food science & technology*, 27(3), 285–295.
- Dubois, V., Breton, S., Linder, M., Fanni, J., & Parmentier, M. (2008). Proposition de classement des sources végétales d'acides gras en fonction de leur profil nutritionnel. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 15(1), 56–75.
- Dueik, V., Moreno, M. C., & Bouchon, P. (2012). Microstructural approach to understand oil absorption during vacuum and atmospheric frying. *Journal of Food Engineering*, 111(3), 528-536.
- Dueik, V., Robert, P., & Bouchon, P. (2010). Vacuum frying reduces oil uptake and improves the quality parameters of carrot crisps. *Food Chemistry*, 119(3), 1143-1149.
- Duran, M., Pedreschi, F., Moyano, P., & Troncoso, E. (2007). Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 257-265.
- Dybing, E., Farmer, P. B., Andersen, M., Fennell, T. R., Lalljie, S. P. D., Müller, D. J. G., ... Scholz, G. (2005). Human exposure and internal dose assessments of acrylamide in food. *Food and Chemical Toxicology*, 43(3), 365–410.
- Dybing, E., & Sanner, T. (2003). Risk assessment of acrylamide in foods. *Toxicological Sciences*, 75(1), 7-15.
- Eggleston, G., Swennen, R., & Akoni, S. (1991). Differences in composition and texture among plantains, plantain hybrids and a cooking banana. In *Traditional African Foods-Quality and Nutrition. Proceedings of an International Workshop* (p. 179–185).

- Elmore, J. S., Koutsidis, G., Dodson, A. T., Mottram, D. S., & Wedzicha, B. L. (2005). The effect of cooking on acrylamide and its precursors in potato, wheat and rye. In *Chemistry and safety of acrylamide in food* (p. 255–269). Springer.
- Erdogdu, F., & Dejmek, P. (2010). Determination of heat transfer coefficient during high pressure frying of potatoes. *Journal of Food Engineering*, 96(4), 528-532.
- Estela Enriquez-Fernandez, B., Alvarez de la Cadena y Yanez, L., & Elena Sosa-Morales, M. (2011). Comparison of the stability of palm olein and a palm olein/canola oil blend during deep-fat frying of chicken nuggets and French fries. *International Journal of Food Science and Technology*, 46(6), 1231-1237.
- Farhoosh, R., Einafshar, S., & Sharayei, P. (2009). The effect of commercial refining steps on the rancidity measures of soybean and canola oils. *Food Chemistry*, 115(3), 933-938.
- Farhoosh, R., Khodaparast, M. H. H., Sharif, A., Hoseini-Yazdi, S.-Z., & Zamani-Ghalehshahi, A. (2012). Antioxidative and synergistic effects of bene kernel and hull oils during oxidation of virgin olive oil. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 114(11), 1284-1291.
- Farhoosh, R., Khodaparast, M. H. H., Sharif, A., & Rafiee, S. A. (2012). Olive oil oxidation: Rejection points in terms of polar, conjugated diene, and carbonyl values. *Food Chemistry*, 131(4), 1385-1390.
- Farhoosh, R., & Tavassoli-Kafrani, M. H. (2010). Polar compounds distribution of sunflower oil as affected by unsaponifiable matters of Bene hull oil (BHO) and tertiary-butylhydroquinone (TBHQ) during deep-frying. *Food Chemistry*, 122(1), 381-385.
- Farinu, A., & Baik, O. D. (2005). Deep fat frying of foods-transport phenomena. *Food Reviews International*, 21(4), 389-410.
- Farinu, A., & Baik, O.-D. (2007). Heat transfer coefficients during deep fat frying of sweetpotato: Effects of product size and oil temperature. *Food Research International*, 40(8), 989-994.
- Farinu, A., & Baik, O.-D. (2008). Convective mass transfer coefficients in finite element simulations of deep fat frying of sweetpotato. *Journal of Food Engineering*, 89(2), 187-194.

- Farkas, B. E., Singh, R. P., & McCarthy, M. J. (1992). Measurement of oil/water interface in foods during frying. *Advances in food engineering*, 237–245.
- Farkas, B. E., Singh, R. P., & Rumsey, T. R. (1996a). Modeling heat and mass transfer in immersion frying. I, model development. *Journal of Food Engineering*, 29(2), 211–226.
- Farkas, B. E., Singh, R. P., & Rumsey, T. R. (1996b). Modeling heat and mass transfer in immersion frying. II, model solution and verification. *Journal of Food Engineering*, 29(2), 227–248.
- Fazzalari, F. A. (1978). Compilation of odor and taste threshold values data. *ASTM data series*.
- Firestone, D., Stier, R., & Blumenthal, M. (1991). Regulation of frying fats and oils. *Food Technology*, 45(2), 90–94.
- Fiselier, K., Bazzocco, D., Gama-Baumgartner, F., & Grob, K. (2006). Influence of the frying temperature on acrylamide formation in French fries. *European Food Research and Technology*, 222(3-4), 414–419.
- Fiszman, S. M., Salvador, A., & Sanz, T. (2005). Why, when and how hydrocolloids are employed in batter-coated food—A review. *Progress in Food Biopolymer Research*, 1, 55–68.
- Foglia, T., Petruso, K., & Fearheller, S. (1993). Enzymatic Interesterification of Tallow-Sunflower Oil Mixtures. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 70(3), 281–285.
- Förster, A., Kühne, Y., & Henle, T. oma. (2005). Studies on Absorption and Elimination of Dietary Maillard Reaction Products. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1043(1), 474–481.
- Frankel, E. N. (1980). Lipid oxidation. *Progress in lipid research*, 19(1), 1–22.
- Frankel, E. N. (1982). Volatile lipid oxidation products. *Progress in lipid research*, 22(1), 1–33.
- Frankel, E. N. (1985). Chemistry of autoxidation: mechanism, products and flavor significance. *Flavor chemistry of fats and oils*, 1–37.
- Frankel, E. N. (2005). *Lipid oxidation*. The Oily Press.

- Frédéric Bakry, Françoise Carreel, Jean-Pierre Horry, Christophe Jenny & Kodjo Tomekpe (2005). La diversité génétique des bananiers cultivés: situation actuelle et perspectives. "Le Sélectionneur Français, (55), 33-41. - Recherche Google. (s. d.).
- Friedman, M. (2003). Chemistry, biochemistry, and safety of acrylamide. A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(16), 4504-4526.
- Fritsch, C. W. (1981). Measurements of frying fat deterioration: a brief review. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 58(3), 272–274.
- Fullana, A., Carbonell-Barrachina, A. A., & Sidhu, S. (2004a). Comparison of volatile aldehydes present in the cooking fumes of extra virgin olive, olive, and canola oils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(16), 5207-5214.
- Fullana, A., Carbonell-Barrachina, A. A., & Sidhu, S. (2004b). Volatile aldehyde emissions from heated cooking oils. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(15), 2015-2021.
- Funami, T., Funami, M., Tawada, T., & Nakao, Y. (1999). Decreasing oil uptake of doughnuts during deep-fat frying using curdlan. *Journal of Food Science*, 64(5), 883-888.
- Gamble, M. H., & Rice, P. (1987). Effect of pre-fry drying of oil uptake and distribution in potato crisp manufacture. *International Journal of Food Science & Technology*, 22(5), 535–548.
- Gamble, M. H., & Rice, P. (1988). Effect of initial tuber solids content on final oil content of potato chips. *Lebensmittel-Wissenschaft+ Technologie*, 21(1), 62–65.
- Gamble, M. H., Rice, P., & Selman, J. D. (1987a). Distribution and morphology of oil deposits in some deep fried products. *Journal of Food Science*, 52(6), 1742–1743.
- Gamble, M. H., Rice, P., & Selman, J. D. (1987b). Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from cv Record UK tubers. *International Journal of Food Science & Technology*, 22(3), 233–241.
- Gan, H. L., Man, Y. B. C., Tan, C. P., NorAini, I., & Nazimah, S. a H. (2005). Characterisation of vegetable oils by surface acoustic wave sensing electronic nose. *Food Chemistry*, 89(4), 507-518.
- Garayo, J., & Moreira, R. (2002). Vacuum frying of potato chips. *Journal of Food Engineering*, 55(2), 181-191. doi:10.1016/S0260-8774(02)00062-6

- García, M. A., Ferrero, C., Bértola, N., Martino, M., & Zaritzky, N. (2002). Edible coatings from cellulose derivatives to reduce oil uptake in fried products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3(4), 391-397.
- Gasparoli, A. (1998). The formation of new compounds. *Grasas y aceites*, 49(3-4), 303–309.
- Gazmuri, A. M., & Bouchon, P. (2009). Analysis of wheat gluten and starch matrices during deep-fat frying. *Food Chemistry*, 115(3), 999-1005.
- Genot, C., Meynier, A., Riaublanc, A., & Chobert, J. M. (2003). Protein alterations due to lipid oxidation in multiphase systems. 265-292.
- Gertz, C. (2000). Chemical and physical parameters as quality indicators of used frying fats. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102(8-9), 566-572.
- Gertz, C., & Klostermann, S. (2002). Analysis of acrylamide and mechanisms of its formation in deep-fried products. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 104(11), 762-771.
- Ghidurus, M., Turtoi, M., Boskou, G., Niculita, P., & Stan, V. (2010). Nutritional and health aspects related to frying (I). *Romanian Biotechnological Letters*, 15(6), 5675–5682.
- Gibert, O., Dufour, D., Giraldo, A., Sanchez, T., Reynes, M., Pain, J.-P., Diaz, A. (2009). Differentiation between Cooking Bananas and Dessert Bananas. 1. Morphological and Compositional Characterization of Cultivated Colombian Musaceae (*Musa* sp.) in Relation to Consumer Preferences. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(17), 7857-7869.
- Gibert, O., Giraldo, A., Ucles-Santos, J.-R., Sanchez, T., Fernandez, A., Bohuon, P., Dufour, D. (2010). A kinetic approach to textural changes of different banana genotypes (*Musa* sp.) cooked in boiling water in relation to starch gelatinization. *Journal of Food Engineering*, 98(4), 471-479.
- Gloria, H., & Aguilera, J. M. (1998). Assessment of the quality of heated oils by differential scanning calorimetry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(4), 1363-1368.
- Gokmen, V., Palazoglu, T. K., & Senyuva, H. Z. (2006). Relation between the acrylamide formation and time-temperature history of surface and core regions of French fries. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 972-976.

- Gordon, M. H., & Kourkimská, L. (1995). The effects of antioxidants on changes in oils during heating and deep frying. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 68(3), 347–353.
- Graham-Acquaah, S., Ayernor, G. s., Bediako-Amoa, B., Saalia, F. s., Afoakwa, E. o., & Abbey, L. (2014). Effect of Blanching and Frying on Textural Profile and Appearance of Yam (*Dioscorea rotundata*) French Fries. *Journal of Food Processing and Preservation*, n/a–n/a.
- Graille, J. (1998). Réactions chimiques induites par la friture. La friture : maîtrise du procédé et de la qualité des produits. *OCL. Oléagineux, corps gras, lipides*, 5(1), 36–40.
- Granda, C., Moreira, R. G., & Tichy, S. E. (2004). Reduction of acrylamide formation in potato chips by low-temperature vacuum frying. *Journal of Food Science*, 69(8), E405–E411.
- Grierson, D., Tucker, G. ., & Robertson, N. . (1981). The molecular biology of ripening. In: Friend J. & Rhodes M.J.C., eds. *Recent advances in the biochemistry of fruits and vegetables*. London: Academic Press, 149- 160.
- Grob, K. (2007). Options for legal measures to reduce acrylamide contents in the most relevant foods. *Food additives and contaminants*, 24(sup1), 71–81.
- Grob, K., Biedermann, M., Biedermann-Brem, S., Noti, A., Imhof, D., Amrein, T., Bazzocco, D. (2003). French fries with less than 100 µg/kg acrylamide. A collaboration between cooks and analysts. *European Food Research and Technology*, 217(3), 185-194.
- Grosch, W. (1982). Lipid degradation products and flavour. *Food flavours*. Amsterdam: Elsevier, 325–98.
- Grosch, W. (1987). Reactions of hydroperoxides-products of low molecular weight. *Autoxidation of unsaturated lipids*, 95–139.
- Guillaumin, R. (1973). Détermination des espèces chimiques nouvelles formées durant le chauffage des huiles. *Rev. Fr. Corps Gras*, 20, 285–289.
- Guillaumin, R. (1988). Kinetics of fat penetration in food. *Frying of food*, 82–90.
- Gulia, N., & Khatkar, B. S. (2013). Effect of Processing Variables on the Oil Uptake, Textural Properties and Cooking Quality of Instant Fried Noodles. *Journal of Food Quality*, 36(3), 181–189.

- Gunaratne, A., & Hoover, R. (2002). Effect of heat–moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. *Carbohydrate polymers*, 49(4), 425–437.
- Gupta, M. K. (1993). Designing frying fat. In *Proceedings of World Conference on Oilseed and Technology and Utilization* (p. 204–208).
- Haase, N. U., Matthäus, B., & Vosmann, K. (2003). Minimierungsansätze zur Acrylamid-Bildung in pflanzlichen Lebensmitteln: aufgezeigt am Beispiel von Kartoffelchips. *Deutsche Lebensmittel-Rundschau*, 99(3), 87-90.
- Hagenimana, V., Karuri, E. G., & Oyunga, M. A. (1998). Oil content in fried processed sweetpotato products. *Journal of food processing and preservation*, 22(2), 123–137.
- Hallstrom, B., Skjoldebrand, C., & Trägårdh, C. (1988). *Heat transfer and food products*. Elsevier Applied Science.
- Happi Emaga, T., Wathélet, B., & Paquot, M. (2008). Changements texturaux et biochimiques des fruits du bananier au cours de la maturation. Leur influence sur la preservation de la qualite du fruit et la maitrise de la maturation.
- Hawrysh, Z., Erin, M., Kim, S., & Hardin, R. (1995). Sensory and Chemical-Stability of Tortilla Chips Fried in Canola Oil, Corn-Oil, and Partially Hydrogenated Soybean Oil. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 72(10), 1123-1130. doi:10.1007/BF02540977
- Hein, M., Henning, H., & Isengard, H. D. (1998). Determination of total polar parts with new methods for the quality survey of frying fats and oils. *Talanta*, 47(2), 447-454.
- Hendriksen, H. V., Kornbrust, B. A., Ostergaard, P. R., & Stringer, M. A. (2009). Evaluating the Potential for Enzymatic Acrylamide Mitigation in a Range of Food Products Using an Asparaginase from *Aspergillus oryzae*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(10), 4168-4176.
- Hernandez-Jaimes, C., Bello-Perez, L. A., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramirez, J. (2013). Plantain starch granules morphology, crystallinity, structure transition, and size evolution upon acid hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*, 95(1), 207-213.
- Heslop-Harrison, J. S., & Schwarzacher, T. (2007). Domestication, Genomics and the Future for Banana. *Annals of Botany*, 100(5), 1073-1084.

- Hibbert, D. B. (2012). Experimental design in chromatography: A tutorial review. *Journal of Chromatography B-Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences*, 910, 2-13.
- Hodge, J. E. (1953). Dehydrated foods, chemistry of browning reactions in model systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1(15), 928–943.
- Hubbard, L. J., & Farkas, B. E. (1999). A method for determining the convective heat transfer coefficient during immersion frying. *Journal of Food Process Engineering*, 22(3), 201-214.
- Hubbard, L. J., & Farkas, B. E. (2000). Influence of oil temperature on convective heat transfer during immersion frying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 24(2), 143-162.
- Ikoko, J., & Kuri, V. (2007). Osmotic pre-treatment effect on fat intake reduction and eating quality of deep-fried plantain. *Food Chemistry*, 102(2), 523-531.
- Innawong, B. (2001). *Improving fried product and frying oil quality using nitrogen gas in a pressure frying system*. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Jackman, R. L., & Stanley, D. W. (1995). Perspectives in the textural evaluation of plant foods. *Trends in Food Science & Technology*, 6(6), 187–194.
- Jeanette, R., Croguennec, T., Schuck, P., & Brulé, G. (2006). Science des aliments. V1, *Tec et Doc Lavoisier*, 383.
- John, P., & Marchal, J. (1995). Ripening and biochemistry of the fruit. In *Bananas and plantains* (p. 434–467). Springer.
- Jones, D. R. (2000). Diseases of banana, abaca and enset.
- Jose Crosa, M., Skerl, V., Cadenazzi, M., Olazabal, L., Silva, R., Suburu, G., & Torres, M. (2014). Changes produced in oils during vacuum and traditional frying of potato chips. *Food Chemistry*, 146, 603-607.
- Juárez, M. D., Osawa, C. C., Acuña, M. E., Sammán, N., & Gonçalves, L. A. G. (2011). Degradation in soybean oil, sunflower oil and partially hydrogenated fats after food frying, monitored by conventional and unconventional methods. *Food Control*, 22(12), 1920-1927.

- Kalogianni, E. P., Karapantsios, T. D., & Miller, R. (2011). Effect of repeated frying on the viscosity, density and dynamic interfacial tension of palm and olive oil. *Journal of Food Engineering*, 105(1), 169-179.
- Karazhiyan, H., Razavi, S. M. A., & Phillips, G. O. (2011). Extraction optimization of a hydrocolloid extract from cress seed (*Lepidium sativum*) using response surface methodology. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 915-920.
- Karim, A. A., Nadiha, M. Z., Chen, F. K., Phuah, Y. P., Chui, Y. M., & Fazilah, A. (2008). Pasting and retrogradation properties of alkali-treated sago (*Metroxylon sagu*) starch. *Food Hydrocolloids*, 22(6), 1044–1053.
- Katragadda, H. R., Fullana, A., Sidhu, S., & Carbonell-Barrachina, A. A. (2010). Emissions of volatile aldehydes from heated cooking oils. *Food Chemistry*, 120(1), 59-65.
- Kawas, M. L., & Moreira, R. G. (2001). Characterization of product quality attributes of tortilla chips during the frying process. *Journal of Food Engineering*, 47(2), 97-107.
- Keller, C., Escher, F., & Solms, J. (1986). A method for localizing fat distribution in deep-fat fried potato products. *Lebensmittel-Wissenschaft+ Technologie*, 19(4), 346–348.
- Keszler, A., Kriska, T., & Nemeth, A. (2000). Mechanism of volatile compound production during storage of sunflower oil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(12), 5981-5985.
- Khalil, A. H. (1999). Quality of french fried potatoes as influenced by coating with hydrocolloids. *Food Chemistry*, 66(2), 201-208.
- Kiatsrichart, S., Brewer, M. S., Cadwallader, K. R., & Artz, W. E. (2003). Pan-frying stability of NuSun oil, a mid-oleic sunflower oil. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 80(5), 479-483.
- Kidmose, U., Yang, R.-Y., Thilsted, S. H., Christensen, L. P., & Brandt, K. (2006). Content of carotenoids in commonly consumed Asian vegetables and stability and extractability during frying. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(6-7), 562-571.
- Kim, D. N., Lim, J., Bae, I. Y., Lee, H. G., & Lee, S. (2011). Effect of hydrocolloid coatings on the heat transfer and oil uptake during frying of potato strips. *Journal of Food Engineering*, 102(4), 317-320.

- Kim, T. S., Yeo, J., Kim, J. Y., Kim, M.-J., & Lee, J. (2013). Determination of the degree of oxidation in highly-oxidised lipids using profile changes of fatty acids. *Food Chemistry*, 138(2-3), 1792-1799.
- Kiritsakis, A., & Osman, M. (1995). Effets du bêta-carotène et de l'alphatocophérol sur la stabilité photo-oxydative de l'huile d'olive. *Olivae*, 56, 25–8.
- Kita, A., Lisinska, G., & Golubowska, G. (2007). The effects of oils and frying temperatures on the texture and fat content of potato crisps. *Food Chemistry*, 102(1), 1-5.
- Kita, A., Lisińska, G., & Powolny, M. (2005). The influence of frying medium degradation on fat uptake and texture of French fries. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(7), 1113–1118.
- Koh, S. P., Arifin, N., Tan, C. P., Yusoff, M. S. A., Long, K., & Lai, O. M. (2011). Deep Frying Performance of Enzymatically Synthesized Palm-Based Medium- and Long-Chain Triacylglycerols (MLCT) Oil Blends. *Food and Bioprocess Technology*, 4(1), 124-135.
- Koh, S. P., Tan, C. P., Arifin, N., Yusoff, M. S. A., Long, K., & Lai, O. M. (2009). Thermal and Viscosity Properties of Medium- and Long-Chain Triacylglycerol Blends. *Journal of Food Lipids*, 16(4), 569-588.
- Konings, E. J. M., Baars, A. J., van Klaveren, J. D., Spanjer, M. C., Rensen, P. M., Hiemstra, M., Peters, P. W. J. (2003). Acrylamide exposure from foods of the Dutch population and an assessment of the consequent risks. *Food and Chemical Toxicology*, 41(11), 1569-1579.
- Kozempel, M., Tomasula, P., & Craig, J. (1991). Correlation of Moisture and Oil Concentration in French Fries. *Food Science and Technology-Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 24(5), 445-448.
- Krokida, M. K., Oreopoulou, V., & Maroulis, Z. B. (2000a). Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. *Journal of Food Engineering*, 43(3), 147-154.
- Krokida, M. K., Oreopoulou, V., & Maroulis, Z. B. (2000b). Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering*, 44(1), 39-46.
- Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B., & Marinos-Kouris, D. (2001a). Effect of osmotic dedydration pretreatment on quality of french fries. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 339-345.

- Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B., & Marinou-Kouris, D. (2001b). Effect of pre-drying on quality of French fries. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 347-354.
- Kulkarni, M. G., & Dalai, A. K. (2006). Waste cooking oil-an economical source for biodiesel: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(9), 2901-2913.
- Labuza, T. P., & Dugan, L. R. (1971). Kinetics of lipid oxidation in foods. *C R C Critical Reviews in Food Technology*, 2(3), 355-405.
- Lam, M. K., Lee, M. T., & Mohamed, A. R. (2010). Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review. *Biotechnology Advances*, 28(4), 500-518.
- Lamberg, I., Hallstroem, B., & Olsson, H. (1990). Fat uptake in a potato drying/frying process. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 23(4), 295-300.
- Lassois, L., Busogoro, J.-P., & Jijakli, H. (2009). La banane : de son origine à sa commercialisation. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 13, 575-586.
- Lassoudière, A. (2007). *Bananier et sa culture (le)*. Editions Quae.
- Legrand, P. (2007). Les Acides Gras : Structures, Fonctions, Apports Nutritionnels Conseillés. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 42, Supplement 1, 7-12.
- Lemaire, H., Reynes, M., Ngalani, J. A., & Guillaumont, A. (1997). Aptitude à la friture de cultivars de plantains et bananes à cuire. *Fruits*, 52(4), 273-282.
- Li, M., Slaughter, D. C., & Thompson, J. F. (1997). Optical chlorophyll sensing system for banana ripening. *Postharvest biology and technology*, 12(3), 273-283.
- Liégeois, V. (2001). Les bases nutritionnelles de la consommation des fruits et légumes. *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 87(7), 145-155.
- Lioumbas, J. S., Ampatzidis, C., & Karapantsios, T. D. (2012). Effect of potato deep-fat frying conditions on temperature dependence of olive oil and palm oil viscosity. *Journal of Food Engineering*, 113(2), 217-225.
- Lioumbas, J. S., Kostoglou, M., & Karapantsios, T. D. (2012). Surface water evaporation and energy components analysis during potato deep fat frying. *Food Research International*, 48(1), 307-315.

- Liu, H.-R., & White, P. J. (1992). Oxidative stability of soybean oils with altered fatty acid compositions. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 69(6), 528–532.
- Lopez-Garcia, E., Schulze, M. B., Meigs, J. B., Manson, J. a. E., Rifai, N., Stampfer, M. J., Hu, F. B. (2005). Consumption of *trans* fatty acids is related to plasma biomarkers of inflammation and endothelial dysfunction. *Journal of Nutrition*, 135(3), 562-566.
- Lulai, E. C., & Orr, P. H. (1979). Influence of potato specific gravity on yield and oil content of chips. *American Potato Journal*, 56(8), 379–390.
- M'Hamdi, M., Rouvière, C., Rojas-Beltran, J., & du Jardin, P. (2003). Optimisation de la transformation génétique de la pomme de terre par *Agrobacterium tumefaciens*. Utilisation de la résistance à l'hygromycine comme marqueur sélectif. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 7(3-4), 183–188.
- Mai Tran, T. T., Chen, X. D., & Southern, C. (2007). Reducing oil content of fried potato crisps considerably using a 'sweet' pre-treatment technique. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 719-726.
- Maillard, L.. (1912). Action des acides amines sur les sueves ; formation des mélanoidines par voie méthodique. *Comptes Rendus*, 154-166.
- Makinson, J. H., Greenfield, H., Wong, M. L., & Wills, R. B. H. (1987). Fat uptake during deep-fat frying of coated and uncoated foods. *Journal of food composition and analysis*, 1(1), 93–101.
- Mallikarjunan, P., Chinnan, M. S., Balasubramaniam, V. M., & Phillips, R. D. (1997). Edible coatings for deep-fat frying of starchy products. *Food Science and Technology-Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 30(7), 709-714.
- Man, Y. B. C., & Jaswir, I. (2000). Effect of rosemary and sage extracts on frying performance of refined, bleached and deodorized (RBD) palm olein during deep-fat frying. *Food Chemistry*, 69(3), 301-307.
- Manorama, R., & Rukmini, C. (1991). Effect of processing on β -carotene retention in crude palm oil and its products. *Food Chemistry*, 42(3), 253-264.
- Manral, M., Pandey, M. C., Jayathilakan, K., Radhakrishna, K., & Bawa, A. S. (2008). Effect of fish (*Catla catla*) frying on the quality characteristics of sunflower oil. *Food Chemistry*, 106(2), 634-639.

- Mariscal, M., & Bouchon, P. (2008). Comparison between atmospheric and vacuum frying of apple slices. *Food Chemistry*, 107(4), 1561-1569.
- Marmesat, S., Morales, A., Velasco, J., & Carmen Dobarganes, M. (2012). Influence of fatty acid composition on chemical changes in blends of sunflower oils during thermoxidation and frying. *Food Chemistry*, 135(4), 2333-2339.
- Márquez-Ruiz, G., & Dobarganes, M. C. (1997). Analysis of lipid oxidation products by combination of chromatographic techniques. *New techniques and applications in lipid analysis*, 217–233.
- Marriott, J., & Lancaster, P. A. (1983). Bananas and plantains. *Handbook of Tropical Foods (Harvey T. and Chan Jr., eds). Marcel Dekker, Inc. New York*, 85–143.
- Maskan, M. (2003). Change in colour and rheological behaviour of sunflower seed oil during frying and after adsorbent treatment of used oil. *European Food Research and Technology*, 218(1), 20–25.
- Masson, L., Robert, P., Izaurieta, M., & Romero, N. (1999). Fat deterioration in deep fat frying of «french fries» potatoes at restaurant and food shop sector. *Grasas y Aceites*, 50(6), 460–468.
- Masson, L., Robert, P., Romero, N., Izaurieta, M., Valenzuela, S., Ortiz, J., & Dobarganes, M. C. (1997). Performance of polyunsaturated oils during frying of potatoes in fast food shops: Formation of new compounds and correlations between analytical methods. *Grasas y aceites*, 48(5), 273–281.
- Mazza, G., & Qi, H. (1992). Effect of After-Cooking Darkening Inhibitors on Stability of Frying Oil and Quality of French Fries. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 69(9), 847-853.
- Mcdonough, C., Gomez, M., Lee, J., Waniska, R., & Rooney, L. (1993). Environmental Scanning Electron-Microscopy Evaluation of Tortilla Chip Microstructure During Deep-Fat Frying. *Journal of Food Science*, 58(1), 199-213.
- Mehta, U., & Swinburn, B. (2001). A review of factors affecting fat absorption in hot chips. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 41(2), 133-154.
- Mellema, M. (2003). Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. *Trends in Food Science & Technology*, 14(9), 364-373.

- Melton, S. L., Trigiano, M. K., Penfield, M. P., & Yang, R. (1993). Potato chips fried in canola and/or cottonseed oil maintain high quality. *Journal of food science*, 58(5), 1079–1083.
- Mensink, R. P., & Katan, M. B. (1990). Effect of dietary trans fatty acids on high-density and low-density lipoprotein cholesterol levels in healthy subjects. *New England Journal of Medicine*, 323(7), 439–445.
- Mensink, R. P., Zock, P. L., Kester, A. D. M., & Katan, M. B. (2003). Effects of dietary fatty acids and carbohydrates on the ratio of serum total to HDL cholesterol and on serum lipids and apolipoproteins: a meta-analysis of 60 controlled trials. *American Journal of Clinical Nutrition*, 77(5), 1146-1155.
- Miller, K., Singh, R., & Farkas, B. (1994). Viscosity and Heat-Transfer Coefficients for Canola, Corn, Palm, and Soybean Oil. *Journal of Food Processing and Preservation*, 18(6), 461-472.
- Mir-Bel, J., Oria, R., & Salvador, M. L. (2009). Influence of the vacuum break conditions on oil uptake during potato post-frying cooling. *Journal of Food Engineering*, 95(3), 416-422.
- Morales, F. J., Romero, C., & JimenezPerez, S. (1996). Fluorescence associated with Maillard reaction in milk and milk-resembling systems. *Food Chemistry*, 57(3), 423-428.
- Moreira, R. G., & Bakker-Arkema, F. W. (1989). Moisture desorption model for nonpareil almonds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 42(2), 123–133.
- Moreira, R. G., & Barrufet, M. A. (1998). A new approach to describe oil absorption in fried foods: a simulation study. *Journal of Food Engineering*, 35(1), 1-22.
- Moreira, R. G., Castell-Perez, M. E., & Barrufet, M. A. (1999). Deep fat frying: Fundamentals and applications.
- Moreira, R. G., Palau, J. E., Sun, X., & Mermelstein, N. (1995). Deep-fat frying of tortilla chips: an engineering approach. *Food Technology*, 49(4), 146–150.
- Moreira, R. G., Sun, X. Z., & Chen, Y. H. (1997). Factors affecting oil uptake in tortilla chips in deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*, 31(4), 485-498.
- Moreira, R., Palau, J., & Sun, X. (1995). Simultaneous heat and mass transfer during the deep fat frying of tortilla chips. *Journal of Food Process Engineering*, 18(3), 307–320.

- Morin, O. (2005). Acides gras *trans* : récents développements. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 12(5), 414-421.
- Morin, O., & Pagès-Xatart-Parès, X. (2012). Huiles et corps gras végétaux : ressources fonctionnelles et intérêt nutritionnel. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 19(2), 63–75.
- Mottram, D. S., Wedzicha, B. L., & Dodson, A. T. (2002). Acrylamide is formed in the Maillard reaction. *Nature*, 419(6906), 448-449.
- Moyano, P. C., & Berna, A. Z. (2002). Modeling water loss during frying of potato strips: Effect of solute impregnation. *Drying Technology*, 20(7), 1303-1318.
- Moyano, P. C., & Pedreschi, F. (2006). Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. *Lwt-Food Science and Technology*, 39(3), 285-291.
- Mozaffarian, D., & Clarke, R. (2009). Quantitative effects on cardiovascular risk factors and coronary heart disease risk of replacing partially hydrogenated vegetable oils with other fats and oils. *European Journal of Clinical Nutrition*, 63, S22-S33.
- Mozaffarian, D., Katan, M. B., Ascherio, A., Stampfer, M. J., & Willett, W. C. (2006). Trans fatty acids and cardiovascular disease. *New England Journal of Medicine*, 354(15), 1601–1613.
- Naghshineh, M., Ariffin, A. A., Ghazali, H. M., Mirhosseini, H., Mohammad, A. S., & Kuntom, A. (2009). Influence of Partial Replacement of Olive Oil on Frying Performance of Palm Olein. *Journal of Food Lipids*, 16(4), 554-568.
- Nanji, A. A., Hossein Sadrzadeh, S. M., Yang, E. K., Fogt, F., Meydani, M., & Dannenberg, A. J. (1995). Dietary saturated fatty acids: a novel treatment for alcoholic liver disease. *Gastroenterology*, 109(2), 547–554.
- Nawar, W. W. (1998). Volatile components of the frying process. *Grasas Y Aceites*, 49(3-4), 271-274.
- NF EN ISO. (1999). Corps gras d'origines animale et végétale - Dosage de l'indice d'iode. *Norme Française NF EN ISO*, 3961, 60–203.
- Ng, K. C., Brown, H. D., Blackmore, R. H., & Bushnell, J. (1957). The relation of the calcium content of potato tubers to the quality of potato chips. *Food Technology*, 11(2), 118–122.

- Ngadi, M., Li, Y., & Oluka, S. (2007). Quality changes in chicken nuggets fried in oils with different degrees of hydrogenation. *Lwt-Food Science and Technology*, 40(10), 1784-1791.
- Ngadi, M. O., Wang, Y., Adediji, A. A., & Raghavan, G. S. V. (2009). Effect of microwave pretreatment on mass transfer during deep-fat frying of chicken nugget. *Lwt-Food Science and Technology*, 42(1), 438-440.
- Ngalani, J. A., et Tchango Tchango, J. (1997). Cooking qualities and physicochemical changes during ripening in some banana and plantain hybrids and cultivars. In *International Symposium on Banana in the Subtropics 490* (p. 571–576).
- Ni, H., et Datta, A. K. (1999). Moisture, Oil and Energy Transport During Deep-Fat Frying of Food Materials. *Food and Bioproducts Processing*, 77(3), 194-204.
- Nor, F. M., Mohamed, S., Idris, N. A., & Ismail, R. (2008). Antioxidative properties of Pandanus amaryllifolius leaf extracts in accelerated oxidation and deep frying studies. *Food Chemistry*, 110(2), 319-327.
- Nwokocha, L. M., et Williams, P. A. (2009). Some properties of white and yellow plantain (Musa paradisiaca, Normalis) starches. *Carbohydrate Polymers*, 76(1), 133-138.
- Nyam, K. L., Tan, C. P., Lai, O. M., Long, K., & Man, Y. B. C. (2009). Physicochemical properties and bioactive compounds of selected seed oils. *Lwt-Food Science and Technology*, 42(8), 1396-1403.
- Offem, J., et Thomas, O. (1993). Chemical-Changes in Relation to Mode and Degree of Maturation of Plantain (musa-Paradisiaca) and Banana (musa-Sapientum) Fruits. *Food Research International*, 26(3), 187-193.
- Oliveira, J. C., Pereira, P. M., & Oliveira, F. A. (1994). The role of transport phenomena. *Minimal Processing of Foods and Process Optimization*, 253–279.
- Olle, M. (1998). Les huiles de friture : état de la situation et aspects réglementaires. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 5(1), 55-7.
- Onwueme, I. C. (1978). The tropical tuber crops: yams, cassava, sweet potato, and cocoyams., 248 pp.
- Onyejebu, C. A., & Olorunda, A. O. (1995). Effects of raw materials, processing conditions and packaging on the quality of plantain chips. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 68(3), 279–283.

- Oroszvari, B. K., Bayod, E., Sjöholm, I., & Tornberg, E. (2005). The mechanisms controlling heat and mass transfer on frying of beefburgers. Part 2: The influence of the pan temperature and patty diameter. *Journal of Food Engineering*, 71(1), 18-27.
- Osawa, C. C., Gonçalves, L. A. G., Gumerato, H. F., & Mendes, F. M. (2012). Study of the effectiveness of quick tests based on physical properties for the evaluation of used frying oil. *Food Control*, 26(2), 525-530.
- Oztop, M. H., Sahin, S., & Sumnu, G. (2007). Optimization of microwave frying of potato slices by using Taguchi technique. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 83-91.
- Palmer, J.. (1971). The banana. In: Hulme, A.C. (Ed.). *The Biochemistry of Fruit and Their Products*. Academic Press, London, 2, 65– 115.
- Parimala, K. R., & Sudha, M. L. (2012). Effect of hydrocolloids on the rheological, microscopic, mass transfer characteristics during frying and quality characteristics of puri. *Food Hydrocolloids*, 27(1), 191-200.
- Paul, S., Mittal, G. S., & Chinnan, M. S. (1997). Regulating the use of degraded oil/fat in deep-fat/oil food frying. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 37(7), 635–662.
- Pedreschi, F., Aguilera, J. M., & Arbildua, J. J. (1999). CLSM study of oil location in fried potato slices. *Microscopy and Analysis*, 33–35.
- Pedreschi, F., Aguilera, J. M., & Pyle, L. (2001). Textural characterization and kinetics of potato strips during frying. *Journal of Food Science*, 66(2), 314-318.
- Pedreschi, F., Hernandez, P., Figueroa, C., & Moyano, P. (2005). Modeling water loss during frying of potato slices. *International Journal of Food Properties*, 8(2), 289-299.
- Pedreschi, F., Kaack, K., & Granby, K. (2004). Reduction of acrylamide formation in potato slices during frying. *Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie-Food Science and Technology*, 37(6), 679-685.
- Pedreschi, F., Kaack, K., & Granby, K. (2006). Acrylamide content and color development in fried potato strips. *Food Research International*, 39(1), 40-46.
- Pedreschi, F., Kaack, K., Granby, K., & Troncoso, E. (2007). Acrylamide reduction under different pre-treatments in French fries. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1287-1294.

- Pedreschi, F., & Moyano, P. (2005). Oil uptake and texture development in fried potato slices. *Journal of Food Engineering*, 70(4), 557-563.
- Perrin, J.-L. (1992). Les composés mineurs et les antioxygènes naturels de l'olive et de son huile. *Revue française des corps gras*, 39(1-2), 25-32.
- Pinthus, E. J., Weinberg, P., & Saguy, I. S. (1995). Oil uptake in deep fat frying as affected by porosity. *Journal of Food Science*, 60(4), 767-769.
- Pinthus, E., & Saguy, I. (1994). Initial Interfacial-Tension and Oil Uptake by Deep-Fat Fried Foods. *Journal of Food Science*, 59(4), 804-+.
- Pinthus, Weinberg, P., & Saguy, I. S. (1993). Criterion for oil uptake during deep-fat frying. *Journal of Food Science*, 58(1), 204-205.
- Pokorny, J. (2003). Problème de stabilité des produits alimentaires liés à la présence des lipides. *Lipides et corps gras alimentaires. Paris : Technique et documentation, Lavoisier*, 147-87.
- Poonkuzhali, K., & Palvannan, T. (2011). Thermostabilization of laccase by polysaccharide additives: Enhancement using central composite design of RSM. *Carbohydrate Polymers*, 86(2), 860-864.
- Pravisani, C. I., & Calvelo, A. (1986). Minimum cooking time for potato strip frying. *Journal of Food Science*, 51(3), 614-617.
- Procida, G., Cichelli, A., Compagnone, D., Maggio, R. M., Cerretani, L., & Del Carlo, M. (2009). Influence of chemical composition of olive oil on the development of volatile compounds during frying. *European Food Research and Technology*, 230(2),
- Qi, B., Moore, K. G., & Orchard, J. (2000). Effect of cooking on banana and plantain texture. *Journal of agricultural and food chemistry*, 48(9), 4221-4226.
- Quayson, E. T., & Ayernor, G. S. (2007). Non-enzymatic browning and estimated acrylamide in roots, tubers and plantain products. *Food Chemistry*, 105(4), 1525-1529.
- Rahmani, M. (2000). Étude de la stabilité des huiles d'olive vierge marocaines. *Olivae*, 82, 37-40.
- Rahmani, M., & Saad, L. (1989). Photooxydation des huiles d'olive : influence de la composition chimique. *Revue française des corps gras*, 36(9-10), 355-360.

- Ramírez-Jiménez, A., García-Villanova, B., & Guerra-Hernández, E. (2000). Hydroxymethylfurfural and methylfurfural content of selected bakery products. *Food Research International*, 33(10), 833-838.
- Ranalli, A. (1989). Aspects et problèmes se rattachant au stockage et à la conservation de l'huile d'olive. *Olivae*, 272, 11-8.
- Ravi, R., Prakash, M., & Bhat, K. K. (2005). Sensory odour profiling and physical characteristics of edible oil blends during frying. *Food Research International*, 38(1),
- Rice, P., & Gamble, M. H. (1989). Technical note: modelling moisture loss during potato slice frying. *International Journal of Food Science & Technology*, 24(2), 183-187.
- Rimac-Brncic, S., Lelas, V., Rade, D., & Simundic, B. (2004). Decreasing of oil absorption in potato strips during deep fat frying. *Journal of Food Engineering*, 64(2), 237-241.
- Rojas-Gonzalez, J. A., Avallone, S., Brat, P., Trystram, G., & Bohuon, P. (2006). Effect of deep-fat frying on ascorbic acid, carotenoids and potassium contents of plantain cylinders. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 57(1-2), 123-136.
- Rojas-Gonzalez, J.-A. (2007). *Impact de l'opération de friture du plantain (Musa AAB'barraganete') sur différents marqueurs nutritionnels: caractérisation et modélisation*. AgroParisTech.
- Roman, O., Heyd, B., Broyart, B., Castillo, R., & Maillard, M.-N. (2013). Oxidative reactivity of unsaturated fatty acids from sunflower, high oleic sunflower and rapeseed oils subjected to heat treatment, under controlled conditions. *Lwt-Food Science and Technology*, 52(1), 49-59.
- Romani, S., Bacchiocca, M., Rocculi, P., & Dalla Rosa, M. (2009). Influence of frying conditions on acrylamide content and other quality characteristics of French fries. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22(6), 582-588.
- Romano, R., Giordano, A., Vitiello, S., Le Grottaglie, L., & Musso, S. S. (2012). Comparison of the Frying Performance of Olive Oil and Palm Superolein. *Journal of Food Science*, 77(5), C519-C531.
- Romero, A., Bastida, S., & Sanchez-Muniz, F. J. (2006). Cyclic fatty acid monomer formation in domestic frying of frozen foods in sunflower oil and high oleic acid sunflower oil without oil replenishment. *Food and Chemical Toxicology*, 44(10), 1674-1681.

- Romero, A., Cuesta, C., & Sanchez-Muniz, F. J. (2000). Cyclic fatty acid monomers and thermoxidative alteration compounds formed during frying of frozen foods in extra virgin olive oil. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 77(11), 1169-1175.
- Romero, A., Cuesta, C., & Sánchez-Muniz, F. J. (1998). Effect of oil replenishment during deep-fat frying of frozen foods in sunflower oil and high-oleic acid sunflower oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 75(2), 161–167.
- Rosén, J., & Hellenäs, K.-E. (2002). Analysis of acrylamide in cooked foods by liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Analyst*, 127(7), 880–882.
- Rufian-Henares, J. A., & Morales, F. J. (2006). Determination of acrylamide in potato chips by a reversed-phase LC-MS method based on a stable isotope dilution assay. *Food Chemistry*, 97(3), 555-562.
- Saeleaw, M., & Schleining, G. (2011). Effect of frying parameters on crispiness and sound emission of cassava crackers. *Journal of Food Engineering*, 103(3), 229-236.
- Saguy, I., & Pinthus, E. (1995). Oil Uptake During Deep-Fat Frying - Factors and Mechanism. *Food Technology*, 49(4), 142-&.
- Saguy, I. S., & Dana, D. (2003). Integrated approach to deep fat frying: engineering, nutrition, health and consumer aspects. *Journal of Food Engineering*, 56(2–3), 143-152.
- Sahin, S., Sastry, S. K., & Bayindirli, L. (1999). The determination of convective heat transfer coefficient during frying. *Journal of Food Engineering*, 39(3), 307–311.
- Sahin, S., Sumnu, G., & Altunakar, B. (2005). Effects of batters containing different gum types on the quality of deep-fat fried chicken nuggets. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(14), 2375-2379.
- Sakkas, V. A., Islam, M. A., Stalikas, C., & Albanis, T. A. (2010). Photocatalytic degradation using design of experiments: A review and example of the Congo red degradation. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 33-44. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.10.050
- Salvador, A., Sanz, T., & Fiszman, S. M. (2007). Changes in colour and texture and their relationship with eating quality during storage of two different dessert bananas. *Postharvest Biology and Technology*, 43(3), 319-325.
- Sánchez-Gimeno, A. C., Negueruela, A. I., Benito, M., Vercet, A., & Oria, R. (2008). Some physical changes in Bajo Aragón extra virgin olive oil during the frying process. *Food Chemistry*, 110(3), 654-658.

- Sankat, C. K., Castaigne, F., & Maharaj, R. (1996). The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices. *International journal of food science & technology*, 31(2), 123–135.
- Santos, C. S. P., Cruz, R., Cunha, S. C., & Casal, S. (2013). Effect of cooking on olive oil quality attributes. *Food Research International*, 54(2), 2016-2024.
- Santos, J. C. O., Santos, I. M. G., & Souza, A. G. (2005). Effect of heating and cooling on rheological parameters of edible vegetable oils. *Journal of Food Engineering*, 67(4), 401-405.
- Saravacos, G. D., & Charm, S. E. (1962). A study of mechanism of fruit and vegetable dehydration. *Food technology*, 16(1), 78.
- Sebedio, J. L., & Grandgirard, A. (1989). Cyclic fatty acids: Natural sources, formation during heat treatment, synthesis and biological properties. *Progress in lipid research*, 28(4), 303–336. BBB
- Seruga, B., & Budzaki, S. (2005). Determination of thermal conductivity and convective heat transfer coefficient during deep fat frying of « Krostula » dough. *European Food Research and Technology*, 221(3-4), 351-356.
- Shahidi, F., & Wanasundara, U. N. (2002). Methods for measuring oxidative rancidity in fats and oils. *Food lipids: chemistry, nutrition and biotechnology*, 387–403.
- Sharif, K. M., Rahman, M. M., Azmir, J., Mohamed, A., Jahurul, M. H. A., Sahena, F., & Zaidul, I. S. M. (2014). Experimental design of supercritical fluid extraction - A review. *Journal of Food Engineering*, 124, 105-116.
- Shyu, S. L., Hau, L. B., & Hwang, L. S. (1998). Effect of vacuum frying on the oxidative stability of oils. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 75(10), 1393-1398.
- Shyu, S. L., & Hwang, L. S. (2001). Effects of processing conditions on the quality of vacuum fried apple chips. *Food Research International*, 34(2-3), 133-142.
- Shyu, S.-L., Hau, L.-B., & Hwang, L. S. (2005). Effects of processing conditions on the quality of vacuum-fried carrot chips. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(11), 1903–1908.
- Singthong, J., & Thongkaew, C. (2009). Using hydrocolloids to decrease oil absorption in banana chips. *Lwt-Food Science and Technology*, 42(7), 1199-1203.

- Smith, L. M., Clifford, A. J., Creveling, R. K., & Hamblin, C. L. (1985). Lipid content and fatty acid profiles of various deep-fat fried foods. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 62(6), 996–999.
- Smith, N. J. S., Tucker, G. A., & Jeger, M. J. (1989). Softening and cell wall changes in bananas and plantains [grown from cultivars obtained from a gene bank in the Philippines]. *Aspects of Applied Biology*.
- Smith, S. A., King, R. E., & Min, D. B. (2007). Oxidative and thermal stabilities of genetically modified high oleic sunflower oil. *Food Chemistry*, 102(4), 1208-1213.
- Sobukola, O. P., Awonorin, S. O., Sanni, L. O., & Bamiro, F. O. (2008). Deep-fat frying of yam slices: Optimization of processing conditions using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 32(3), 343-360.
- Soekarto, S. T., Muliawan, D., & Zulviani, R. (1992). Deep frying expansion of indonesian sago chips (krupuk) as affected by the state of its bound water. *Advance in Food Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 1992, 247–55.
- Sosa-Morales, M. E., Orzuna-Espiritu, R., & Velez-Ruiz, J. F. (2006). Mass, thermal and quality aspects of deep-fat frying of pork meat. *Journal of Food Engineering*, 77(3), 731-738.
- Sothornvit, R. (2011). Edible coating and post-frying centrifuge step effect on quality of vacuum-fried banana chips. *Journal of Food Engineering*, 107(3-4), 319-325.
- Southern, C. R., Chen, X. D., Farid, M. M., Howard, B., & Eyres, L. (2000). Determining internal oil uptake and water content of fried thin potato crisps. *Food and Bioproducts Processing*, 78(C3), 119-125.
- Stadler, R. H., & Scholz, G. (2004). Acrylamide: An update on current knowledge in analysis, levels in food, mechanisms of formation, and potential strategies of control. *Nutrition Reviews*, 62(12), 449-467.
- Stevenson, S. G., Vaisey-Genser, M., & Eskin, N. A. M. (1984). Quality control in the use of deep frying oils. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 61(6), 1102–1108.
- Summo, C., Bilancia, M. T., & Caponio, F. (2008). Assessment of the oxidative and hydrolytic degradation of the lipid fraction of mortadella by means of HPSEC analyses of polar compounds. *Meat Science*, 79(4), 722-726.

- Svensson, K., Abramsson, L., Becker, W., Glynn, A., Hellenäs, K.-E., Lind, Y., & Rosén, J. (2003). Dietary intake of acrylamide in Sweden. *Food and Chemical Toxicology*, 41(11), 1581-1586.
- Tan, C. P., Che Man, Y. B., Jinap, S., & Yusoff, M. S. A. (2002). Effects of microwave heating on the quality characteristics and thermal properties of RBD palm olein. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3(2), 157-163.
- Tan, C. P., & Man, Y. B. C. (1999a). Differential scanning calorimetric analysis for monitoring the oxidation of heated oils. *Food Chemistry*, 67(2), 177-184.
- Tan, C. P., & Man, Y. B. C. (1999b). Quantitative differential scanning calorimetric analysis for determining total polar compounds in heated oils. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 76(9), 1047-1057.
- Tan, C. P., Man, Y. B. C., Selamat, J., & Yusoff, M. S. A. (2002). Comparative studies of oxidative stability of edible oils by differential scanning calorimetry and oxidative stability index methods. *Food Chemistry*, 76(3), 385-389.
- Tareke, E., Rydberg, P., Karlsson, P., Eriksson, S., & Törnqvist, M. (2002). Analysis of acrylamide, a carcinogen formed in heated foodstuffs. *Journal of agricultural and food chemistry*, 50(17), 4998–5006.
- Tekaya, I. B., & Hassouna, M. (2005). Étude de la stabilité oxydative de l'huile d'olive vierge extra tunisienne au cours de son stockage. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 12(5), 447–54.
- Teng, L. Y., Chin, N. L., & Yusof, Y. A. (2013). Rheological and textural studies of fresh and freeze-thawed native sago starch-sugar gels. II. Comparisons with other starch sources and reheating effects. *Food Hydrocolloids*.
- Thompson, A. K. (1995). Banana processing. In S. Gowen (Éd.), *Bananas and Plantains* (p. 481-492). Springer Netherlands.
- Tompkins, C., & Perkins, E. G. (2000). Frying performance of low-linolenic acid soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(3), 223–229.
- Tong, C. H., & Lund, D. B. (1993). Microwave heating of baked dough products with simultaneous heat and moisture transfer. *Journal of Food Engineering*, 19(4), 319–339.

- Totte, A., Diaz, A., Marouze, C., & RaoultWack, A. L. (1996). Deep-fat frying of plantain (*Musa paradisiaca* L) .2. Experimental study of solid/liquid phase contacting systems. *Food Science and Technology-Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 29(7), 599-605.
- Troncoso, E., & Pedreschi, F. (2009). Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT - Food Science and Technology*, 42(6), 1164-1173.
- Trystram, G. (2010). Effets des transformations industrielles des pommes de terre sur les propriétés nutritionnelles. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 45(6, Supplement 1), S52-S59.
- Tucker, G. A., & Grierson, D. (2013). Fruit ripening. *The biochemistry of plants*, 12, 265–318.
- Tynek, M., Hazuka, Z., Pawlowicz, R., & Dudek, M. (2001). Changes in the frying medium during deep frying of food rich in proteins and carbohydrates. *Journal of Food Lipids*, 8(4), 251–261.
- Ufheil, G., & Escher, F. (1996). Dynamics of oil uptake during deep-fat frying of potato slices. *Food Science and Technology-Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 29(7), 640-644.
- Vaitilingon, G. (2007). Extraction, conditionnement et utilisation des huiles végétales pures carburant. *Enjeux et persepectives des biocarburants pour l'Afrique*.
- Van Loesecke, H. W. (1950). Bananas. *New York: Interscience*.
- Verlinden, B. E., Nicolaï, B. M., & De Baerdemaeker, J. (1995). The starch gelatinization in potatoes during cooking in relation to the modelling of texture kinetics. *Journal of Food Engineering*, 24(2), 165-179.
- Villière, A., & Genot, C. (2006). Approche physico-chimique et sensorielle de l'oxydation des lipides en émulsions. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 13(2), 152–159.
- Vinci, R. M., Mestdagh, F., & De Meulenaer, B. (2012). Acrylamide formation in fried potato products - Present and future, a critical review on mitigation strategies. *Food Chemistry*, 133(4), 1138-1154.
- Vitrac, O. (2000). *Caractérisation expérimentale et modélisation de l'opération de friture*.

- Vitrac, O., Dufour, D., Trystram, G., & Raoult-Wack, A. L. (2002). Characterization of heat and mass transfer during deep-fat frying and its effect on cassava chip quality. *Journal of Food Engineering*, 53(2), 161-176.
- Waldron, K. W., Smith, A. C., Parr, A. J., Ng, A., & Parker, M. L. (1997). New approaches to understanding and controlling cell separation in relation to fruit and vegetable texture. *Trends in Food Science & Technology*, 8(7), 213–221.
- Woolfe, J. A. (1992). *Sweet Potato: An Untapped Food Resource*. Cambridge University Press.
- Wünsch, J.-A. (2004). *Intégration des contraintes du marché dans la conduite des cultures: effets de la différenciation des produits sur la conduite de la culture de pomme de terre de conservation dans les exploitations agricoles de Picardie*. INAPG (AgroParisTech).
- Xu, X. Q., Tran, V. H., Palmer, M., White, K., & Salisbury, P. (1999). Chemical and physical analyses and sensory evaluation of six deep-frying oils. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 76(9), 1091-1099.
- Yagua, C. V., & Moreira, R. G. (2011). Physical and thermal properties of potato chips during vacuum frying. *Journal of Food Engineering*, 104(2), 272-283.
- Yamagishi, S., Nakamura, K., & Inoue, H. (2005). Possible participation of advanced glycation end products in the pathogenesis of osteoporosis in diabetic patients. *Medical hypotheses*, 65(6), 1013–1015.
- Yamsaengsung, R., & Moreira, R. G. (2002a). Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying - Part 1: model development. *Journal of Food Engineering*, 53(1), 1-10.
- Yamsaengsung, R., & Moreira, R. G. (2002b). Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying - Part II: model solution & validation. *Journal of Food Engineering*, 53(1), 11-25.
- Yaylayan, V. A., & Stadler, R. H. (2005). Acrylamide formation in food: A mechanistic perspective. *Journal of AOAC International*, 88(1), 262-267.
- Yıldız, A., Koray Palazoğlu, T., & Erdoğan, F. (2007). Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 11-17.

- Yoon, S. H., Kim, S. K., Shin, M. G., & Kim, K. H. (1985). Comparative study of physical methods for lipid oxidation measurement in oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 62(10), 1487–1489.
- Zhang, C. X., Wu, H., & Weng, X. C. (2004). Two novel synthetic antioxidants for deep frying oils. *Food Chemistry*, 84(2), 219-222.
- Zhang, J., Wu, D., Liu, D., Fang, Z., Chen, J., Hu, Y., & Ye, X. (2013). Effect of Cooking Styles on the Lipid Oxidation and Fatty Acid Composition of Grass Carp (*ctenopharynyodon Idellus*) Fillet. *Journal of Food Biochemistry*, 37(2), 212-219.
- Zhang, Q., Saleh, A. S. M., Chen, J., & Shen, Q. (2012). Chemical alterations taken place during deep-fat frying based on certain reaction products: A review. *Chemistry and Physics of Lipids*, 165(6), 662-681.
- Ziaifar, A. M. (2008). *Absorption d'huile pendant la friture profonde : mécanismes et facteurs importants*. AgroParisTech.
- Zribi, A., Jabeur, H., Aladedunye, F., Rebai, A., Matthaeus, B., Bouaziz, M., 2014. Monitoring of Quality and Stability Characteristics and Fatty Acid Compositions of Refined Olive and Seed Oils during Repeated Pan- and Deep-Frying Using GC, FT-NIRS, and Chemometrics. *J. Agric. Food Chem.* 62, 10357–10367.
- Zyzak, D. V., Sanders, R. A., Stojanovic, M., Tallmadge, D. H., Eberhart, B. L., Ewald, D. K., Villagran, M. D. (2003). Acrylamide formation mechanism in heated foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(16), 4782-4787.

ANNEXES

8 ANNEXES



Figure 8-1 : Banane plantain mûre de variété « Hartons »



Figure 8-2 : Ensemble du matériel utilisé pour la préparation du plantain : trancheuse électrique SEB (A), enregistreur des données Almemo (B) ; emporte-pièce manuel (C) ; et friteuse ménagère électrique (D).



Figure 8-3 : Différentes huiles végétales utilisées (Frial, soja et palme raffinée oléine).



Figure 8-4 : Tranches de banane plantain avant (A) et après (B) friture.

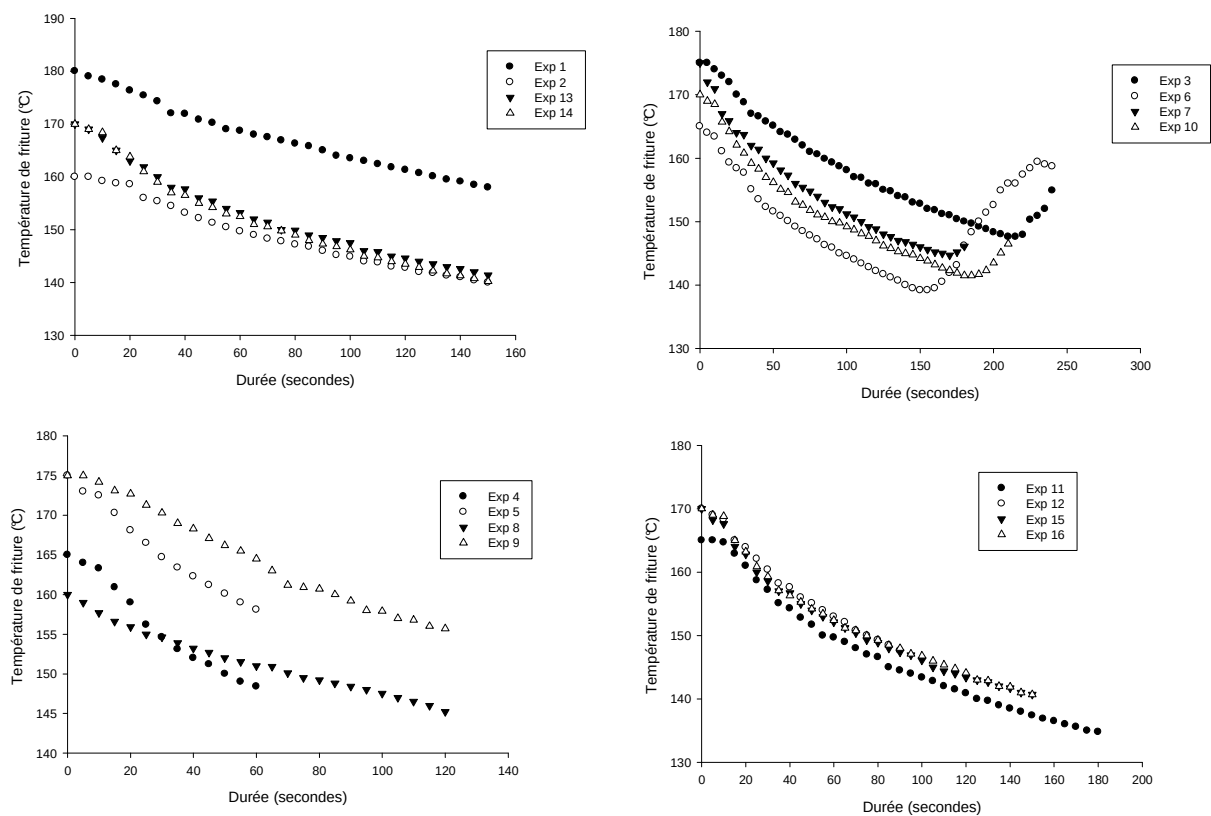


Figure 8-5 : Cinétiques de température au cours de la friture de la banane plantain dans de l'huile Frial.

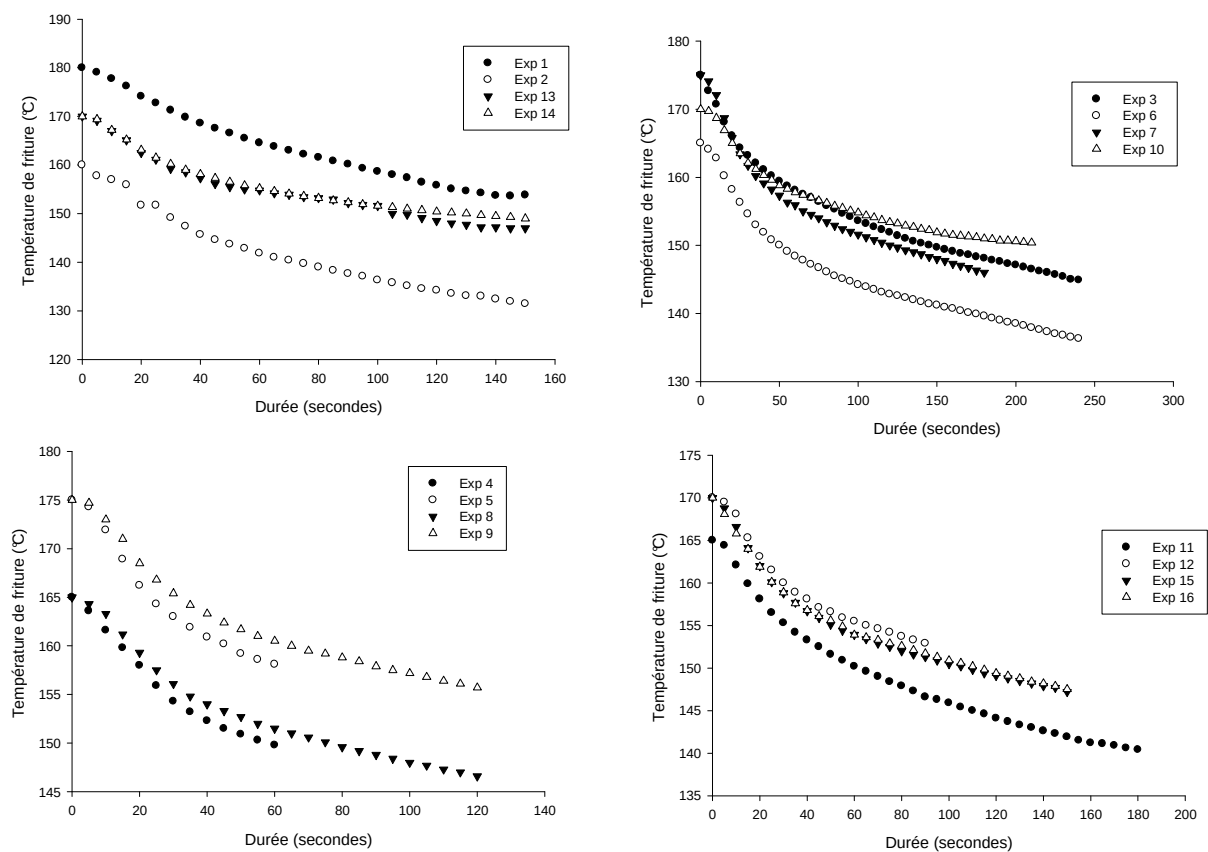


Figure 8-6 : Cinétiques de température au cours de la friture de banane plantain dans de l'huile de soja.

Week / Μήνας : _____
Month / Έτος : _____
Year / Εβδομάδα : _____

[illegible]

Please look at the top of the blue dot!
Παρακαλώ κοιτάξτε το πάνω μέρος της μπλε κουκίδας



On the example, oil is valid.
Στο παράδειγμα το λάδι δεν
χρειάζεται αλλαγή.
Ref: FYI301601198

Please photocopy this historysheet at the same scale.

And stick your strips weekly on the sheet, to monitor the quality of your frying oil.

Φωτοτυπώστε την σελίδα αυτή στο ίδιο μέγεθος, τοποθετώντας τις ταινίες σας επάνω στην σελίδα εβδομαδιαία, για να ελέγχετε την ποιότητα του λαδιού που χρησιμοποιείτε.

Στο παράδειγμα που υπάρχει ήδη στην σελίδα το λάδι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα, καθώς ελέγχουμε πάντα το επάνω μέρος της μηλε κουζίνας.

3M UK PLC - Food Service Trade department
Tel. 01 234 229496
3M Hellas Limited, Food Service trade department
Τηλ : +3 210 6885300

Figure 8-7 : Fiche de mesure des composés polaires totaux par la méthode PCT 120 3M

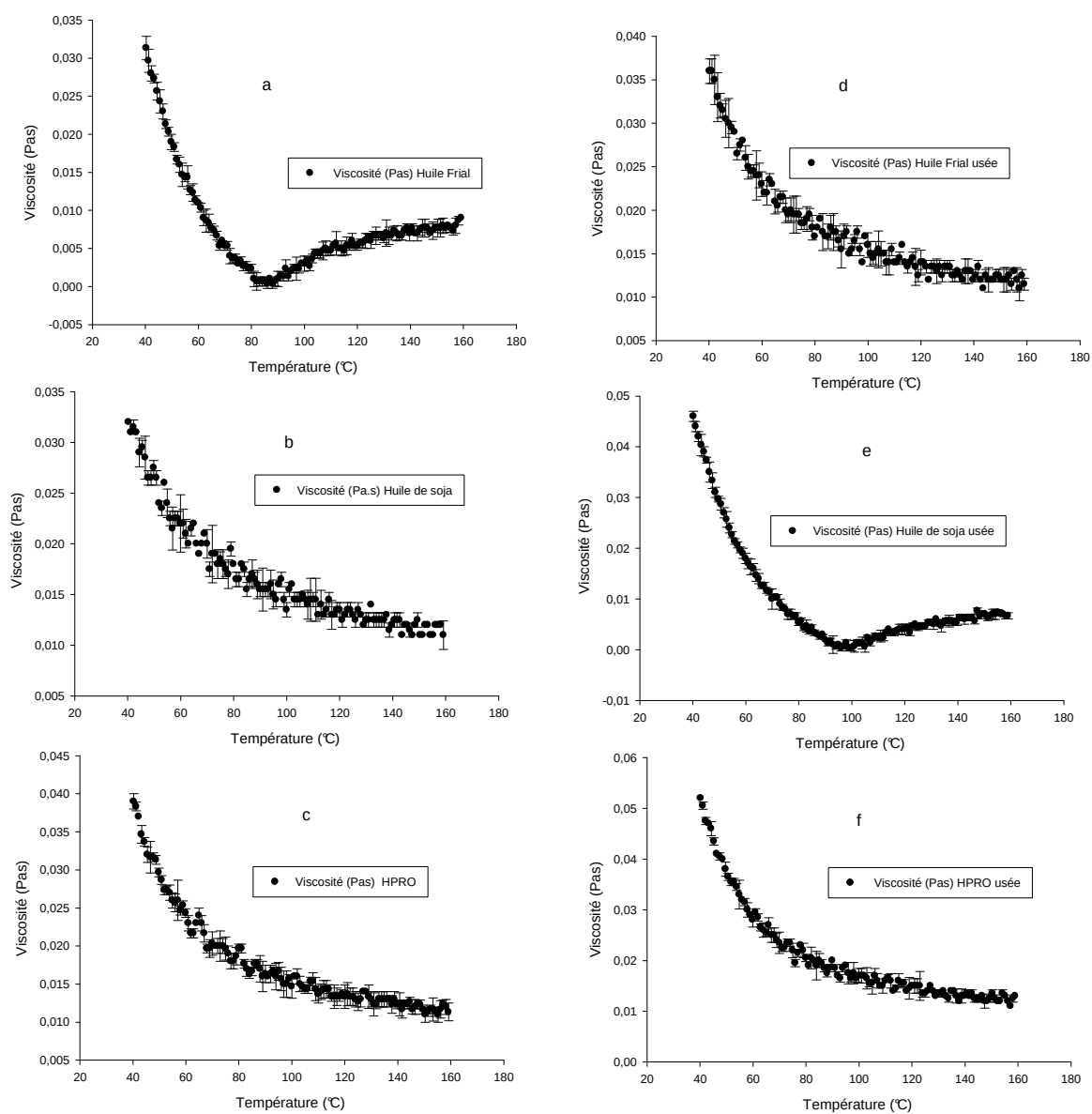


Figure 8-8 : Courbes de cinétiques de viscosité des huiles neuves (a, b et c) et vieilles (d, e et f) frial, de soja et de palme raffinée oléine en fonction de la température

FICHE DE DEGUSTATION D'EVALUATION SENSORIELLE

Nom et prénom :

Date :

Des disques de banane plantain frits vous sont présentés : veuillez évaluer le produit en termes de couleur, sucré, fondant et gras. Indiquez dans quelle mesure vous appréciez ou non le produit en cochant sur l'échelle indiquée. Vous porterez ensuite votre impression générale sur le produit.

pas assez coloré

juste comme il faut

trop coloré

Couleur : 

pas assez coloré

juste comme il faut

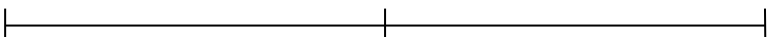
trop coloré

Sucré : 

pas assez coloré

juste comme il faut

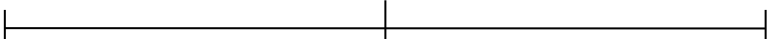
trop coloré

Fondant : 

pas assez coloré

juste comme il faut

trop coloré

Gras : Appréciation globale du produit :

Très désagréable

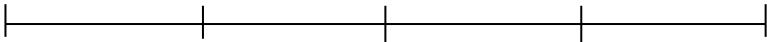
désagréable

ni désagréable

agréable

très agréable

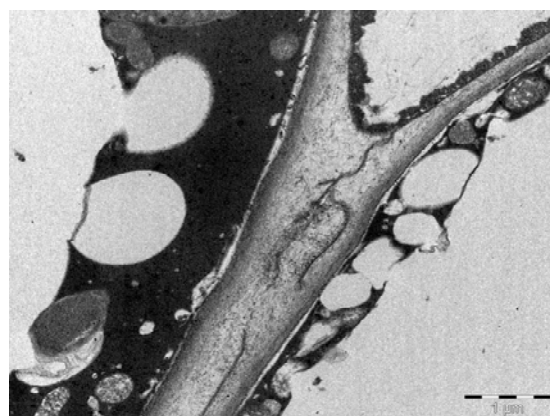
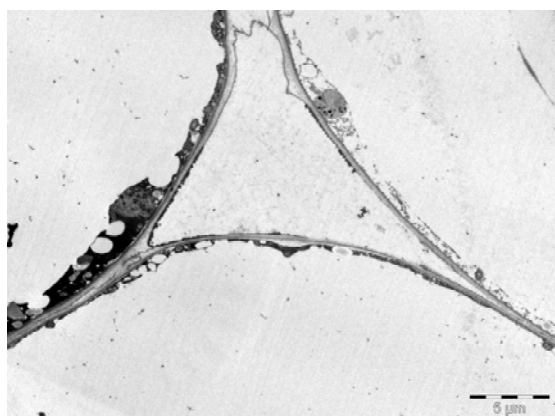
ni agréable



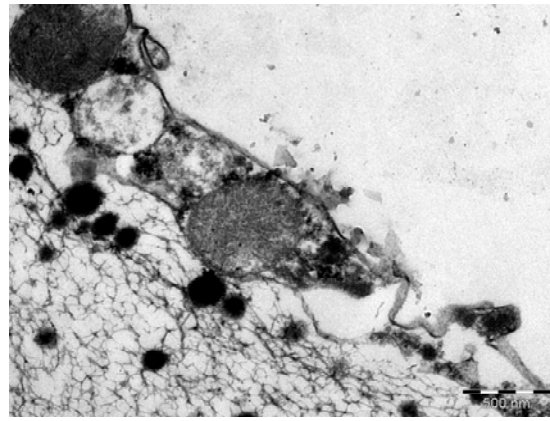
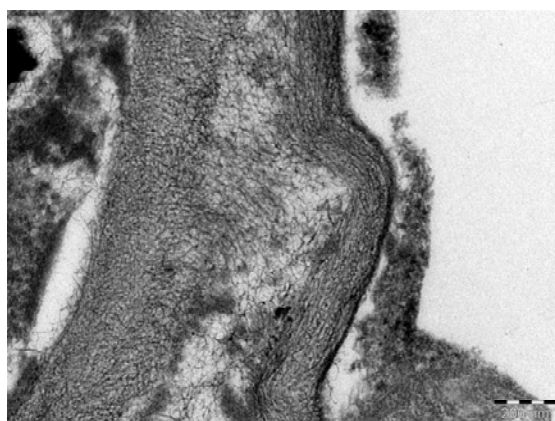
Merci de votre participation.

Tableau 8-1: Evaluation sensorielle de la banane plantain frite à l'huile Frial.

N° expérience	couleur	sucré	fondant	gras	acceptabilité générale
Exp1	5,03±1,26	5,00±0,81	5,04±1,73	6,82±2,24	7,37±1,48
Exp2	6,02±1,72	6,10±0,80	6,10±1,23	5,8±2,21	6,50±1,28
Exp3	5,68±1,66	4,04±1,57	3,39±1,77	6,67±2,00	6,52±2,05
Exp4	3,63±1,54	4,81±1,26	5,24±2,26	5,88±2,18	7,07±1,70
Exp5	5,67±1,73	5,38±1,52	5,62±1,91	6,31±2,12	7,03±1,61
Exp6	4,50±1,31	3,71±2,00	3,09±2,04	4,46±2,13	5,767±2,02
Exp7	5,08±1,60	5,05±1,31	4,74±1,68	6,43±1,99	7,00±1,85
Exp8	7,51±1,48	7,05±1,73	7,52±2,00	8,41±2,04	7,44±1,80
Exp9	6,05±1,62	5,68±1,97	6,03±1,34	7,48±2,05	6,35±1,77
Exp10	6,90±1,98	5,47±1,25	5,77±1,71	6,50±2,22	6,61±1,07
Exp11	4,79±1,73	4,98±1,97	4,88±2,25	7,78±1,85	5,23±1,60
Exp12	3,16±2,33	5,04±1,08	5,30±2,36	5,78±2,92	5,94±1,96
Exp13	5,44±1,35	5,68±1,61	6,09±2,08	6,88±2,30	6,51±1,93

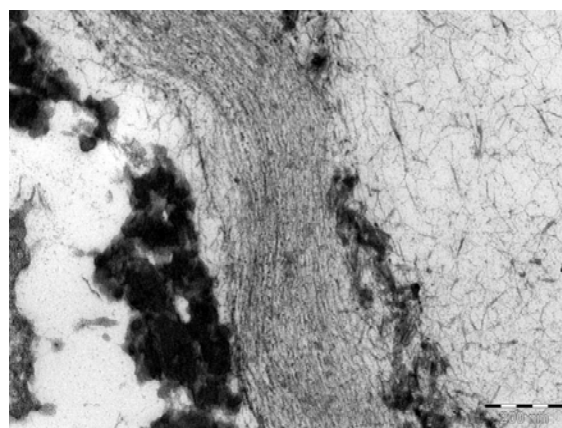


Extérieur frais

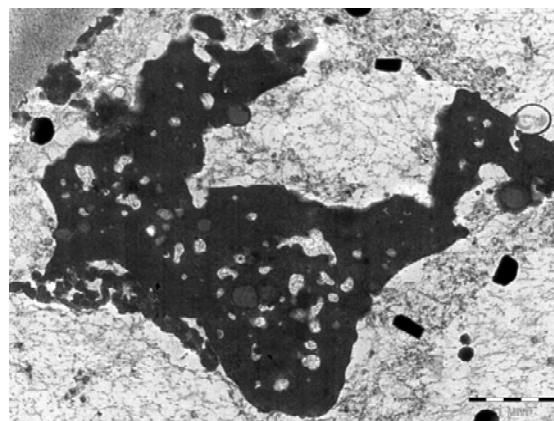
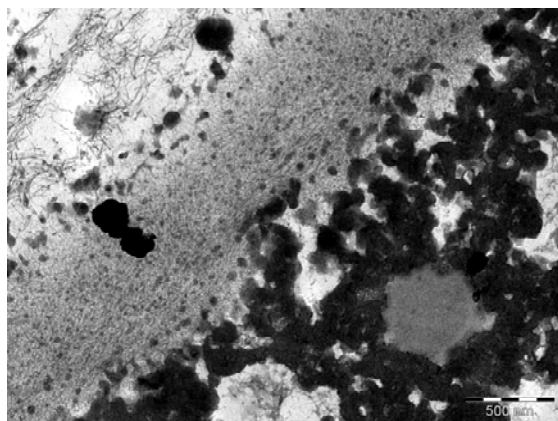


Intermédiaire frais

Figure 8-9 : Observation au microscope électronique à balayage (MET) de la structure de la banane plantain avant friture.



Extérieur frit



Intermédiaire frit

Figure 8-10 : Observation au microscope électronique à balayage (MET) de la structure de la banane plantain après friture.

Résumé

La banane plantain est un fruit couramment consommé au Congo-Brazzaville sous la forme cuite en tant qu'accompagnement. Le procédé de friture profonde de la banane plantain est une pratique très répandue, souvent mal maîtrisée, compte tenu de l'utilisation prolongée des huiles de friture entraînant la formation de composés néfastes à la santé.

En effet, depuis un certain nombre d'années, la consommation d'huiles locales (soja, palme) et leurs dégradations après chauffage constituent une des préoccupations principales pour la sécurité sanitaire du consommateur. Les objectifs de cette thèse consistaient à étudier l'influence du procédé de la friture profonde appliqué à la banane plantain *Musa AAB*, variété « harton » au stade de maturité 7, consommée sous la forme de disque.

Nous avons dans un premier temps appliqué la méthodologie des surfaces de réponse au procédé de friture profonde, afin de déterminer l'influence de trois paramètres (temps / température / quantité) sur différentes réponses (couleur, dureté, teneurs en huile et en eau des produits frits) en fonction de la nature de l'huile utilisée (soja, palme, huile Frial). Une fois les conditions optimales obtenues sur la banane plantain en condition domestique, l'étude s'est focalisée sur l'évolution de la stabilité des huiles de friture par le suivi des paramètres physico-chimiques de dégradation de ces dernières (composés polaires totaux, acides gras libres, composés primaires et secondaires d'oxydation). Des analyses de la couleur, du point de cristallisation et de la viscosité sont venues compléter l'étude et ont permis d'établir la durée d'utilisation optimale de ces huiles en fonction de la quantité de banane plantain à frire. Enfin, les mécanismes de transfert d'eau et d'absorption d'huile dans la matrice ont été étudiés et modélisés en fonction de la température, de l'épaisseur et du temps d'immersion.

Mots clés : huiles de friture, banane plantain, transfert de masse, teneur en huile, méthodologie de surface de réponses, stabilité oxydative.

Abstract

Plantain is a fruit commonly consumed in Congo - Brazzaville in its cooked form, as an accompaniment. The process of deep frying plantain is a widespread practice, often poorly mastered, given the prolonged use of frying oils, leading to the formation of compounds harmful to health.

Indeed, for a number of years, the consumption of local oils (soybean, palm) and their degradation after heating are cause of major concern for consumer safety.

The objectives of this study were to investigate the influences of the deep frying process applied on the *Musa AAB* plantain of « harton » variety, maturity level 7, as consumed in sliced form.

We initially applied response surface methodology (RSM) to the deep frying process to determine the influence of three parameters (time / temperature / quantity) on different responses (color, hardness, oil uptake and water content) according to the type of oil used (soybean, palm, Frial oils).

Once optimal conditions were obtained from the plantain in domestic conditions, the study focused on the evolution of frying oil stability, by monitoring physicochemical parameters of the degradation of the aforementioned (total polar compounds, free fatty acids, primary and secondary oxidation products). Analyses of color, crystallization point and viscosity, were added to the study and helped establish the optimal duration of use for these oils depending on the quantity of plantains fried. Lastly, the mechanisms of water transfer and oil uptake in the matrix has been studied and modeled according to temperature, thickness and immersion time.

Keywords: frying oils, plantain banana, mass transfer, oil content, response surface methodology, oxidative stability.