THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Sciences des Aliments et Nutrition

Préparée au sein de l'École doctorale GAIA

Unité de recherche QUALISUD

Titre de la thèse

Propriétés biologiques de bananes de Guinée

Présentée et soutenue publiquement par Mamady DIAWARA

Le 15 décembre 2022

Directeur: Pr. Alain MICHEL, Unité Mixte de Recherche (UMR) 95 Qualisud/CIRAD

Co-directeur: Pr. Louncény TRAORE, Unité de Recherche Chimie Alimentaire UGAN/Conakry

Jury

Mme Fanta TOURE Présidente

Mr Mady CISSE Rapporteur

Mr Donatien KABORE Examinateur

Mme Sylvie MOREL Examinatrice

Mr Patrick Poucheret Invité

1- Resumé

La banane fait partie des fruits les plus cultivés et consommés dans le monde. Parmi ses nombreuses variétés, le cultivar *Musa cavendish* et *Musa paradisiaca* seraient parmi les plus repandues. Malgré ce statut, la littérature scientifique sur les effets nutritionnels et santé est très réduite. Pourtant les données disponibles signalent un potentiel santé intéressant, en particulier sur les dérives métaboliques liées au changement de mode de vie comme le stress oxydant, l'inflammation, l'obésité, l'hypertension, associées à leurs complications. L'objectif de notre recherche a été d'évaluer les effets santé des bananes de Guinée (Cavendish et plantain) en liaison avec le type d'extrait sec obtenu par lyophilisation, broyage, délipidation et macération dans un solvant mixte (eau, alcool et acide). Après l'obtention de l'extrait sec des 2 bananes, nous avons procedé au dosage des polyphénols totaux (TPC) par le réactif de Folin Ciocalteu. La capacité anti-oxydante a été évaluée en combinant les méthodes suivantes: DPPH, ORAC et Mito-tracker. L'activité anti-inflammatoire des extraits secs hydroalcooliques a été évaluée *in vitro* sur un modèle de macrophages inflammatoires par le dosage du NO (Oxyde nitrique), NO scavenging et les cytokines pro-inflammatoires, TNF-α et IL-6.

Le dosage de TPC (Contenu en polyphénols totaux) a revelé que les épluchures de banane renferment un peu plus de polyphénols que la pulpe. Ce qui serait bien en relation avec les activités biologiques de la banane à l'image de divers fruits tropicaux.

A 1 mg/ml, tous les extraits ont présenté une activité antioxydante modérée avec un potentiel anti-oxydant un peu plus élevé dans les extraits de peau de banane (cavendish et plantain). La méthode de Mitosox red a effectivement prouvé que les bananes de Guinée protégeaient les membranes mitochondriales contre les ROS.

L'évaluation de la capacité anti-inflammatoire a prouvé que nos extraits de bananes de Guinée (cavendish et plantain) ne produisaient aucun effet anti-inflammatoire suivant les tests de dosage des cytokines pro-inflammatoire (TNF-α et IL-6). Les extraits de pulpe des 2 variétés de bananes de Guinée inhibent la production du NO de manière dose-dépendante, même cela reste faible (n'atteignant pas 50% d'inhibition). Cette étude démontre que les bananes de Guinée possèdent bien un potentiel anti-oxydant inexploité et une capacité anti-inflammatoire des pulpes correlée à la dose d'essai.

Mots clés: Banane, extrait hydroalcoolique, polyphenol, anti-oxydant, anti-inflammtoire

Mamady DIAWARA, E-mail: mamadydiawara280@yahoo.fr, Tél: (+224) 622 20 82 02 / +33745339275

2- Abstract

The banana is one of the most cultivated and consumed fruits in the world. Among its many varieties, the cultivar Musa cavendish and Musa paradisiaca are among the most widespread. Despite this status, the scientific literature on the nutritional and health effects is very limited. However, the available data indicate an interesting health potential, in particular on metabolic drifts related to lifestyle changes such as oxidative stress, inflammation, obesity, hypertension, associated with their complications. The objective of our research was to evaluate the health effects of Guinea bananas (Cavendish and plantain) in relation to the type of dry extract obtained by freeze-drying, grinding, delipidation and maceration in a mixed solvent (water, alcohol and acid). After obtaining the dry extract of the two bananas, we proceeded to the determination of total polyphenols (TPC) by the Folin Ciocalteu reagent. The antioxidant capacity was evaluated by combining the following methods: DPPH, ORAC and Mito-tracker. The anti-inflammatory activity of hydroalcoholic dry extracts was evaluated in vitro on an inflammatory macrophage model by measuring NO (Nitric Oxide), NO scavenging and pro-inflammatory cytokines, TNF-α and IL-6.

The TPC (Total Polyphenol Content) assay revealed that banana peels contain slightly more polyphenols than the pulp. This would be well related to the biological activities of the banana as well as various tropical fruits.

At 1 mg/ml, all extracts showed moderate antioxidant activity with a slightly higher antioxidant potential in banana peel extracts (cavendish and plantain). The Mitosox red method effectively proved that Guinea bananas protected mitochondrial membranes from ROS.

The evaluation of the anti-inflammatory capacity proved that our Guinea banana extracts (cavendish and plantain) did not produce any anti-inflammatory effect according to the assays of pro-inflammatory cytokines (TNF-α and IL-6). The pulp extracts of the two varieties of Guinea bananas inhibited the production of NO in a dose-dependent manner, even if this remained weak (not reaching 50% inhibition). This study demonstrates that Guinea bananas have an unexploited antioxidant potential and a dose-dependent anti-inflammatory capacity of the pulps.

Key words: Banana, hydroalcoholic extract, polyphenol, antioxidant, anti-inflammatory

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement mon Directeur de thèse, le Professeur Alain MICHEL, de l'UMR Qualisud, université de Montpellier qui, par son expérience, son don d'écoute et sa tolérance, a guidé mon activité tout en préservant mon esprit de jeune chercheur en conquête du savoir durant toute la période de mon séjour de recherche. A travers lui, je voudrais sincèrement dire grand merci à toute l'équipe l'UMR Qualisud. J'ai été bien accueilli, orienté et assisté sans aucune condition. Je citerai particulièrement Mr Patrick POUCHERET, mon encadrant qui fut mon premier contact dans l'équipe. Il a su me mettre sur la bonne voie du début de ma thèse jusqu'au dernier jour, je lui en suis reconnaissant.

Merci à mes amis doctorants pour des moments durs, professionnels et fraternels passés ensemble. Je pense aisément à Bourahima BAMBA, Ibrahima DIALLO, Imane BOUKHERS, Aicha TASNIME, Linda BOUFELDJA, Orianne DUCHAMP, Audrey WARNERY, Moustapha KEITA, etc.

C'est le temps pour moi de souhaiter prompt rétablissement à mon ami doctorant du CIRAD, Moustapha KEITA. Puisse Dieu te rédonner force et santé.

Mes sincèrements remerciements à mon co-directeur de thèse Pr Louncény TRAORE, de l'Université Gamal Abdel Nasser de Conakry, vous avez été bon et bien avec beaucoup de conseils et d'orientations. Puisse Dieu vous grandir!

Mes remerciements vont à l'endroit de feu Sylvie MUNIER, ancienne responsable du laboratoire de Phytothérapie & Aromathérapie, qui par son sens de bonne scientifique, pédagogue et technicienne de laboratoire a su amorcer mes premiers travaux et me donner espoir et courage pour avoir les premiers coups de pioche. Vous aurez voulu être là aujourd'hui pour participer à la présentation de nos résultats d'extraction, obtenus avec beaucoup de sacrifices accordés à un docteur en première année en France. Je vous garderez toujours en mémoire sans oublier votre mari et votre unique garçon. Je joins à ces remerciements votre collaborateur Mr Letessier, l'homme gentil tout court. Merci à vous encore!

Un grand merci à Mesdames Sylvie MOREL, Marie VITOU, Françoise FONS et toute l'équipe du laboratoire de botanique. Ils ont été d'un appui énorme pour déclencher la phase 2 de cette thèse, je vous dis simplement et sincèrement merci. Je préfère remercier encore particulièrement Mesdames Sylvie MOREL et Marie VITOU, désignées au départ comme techniciennes pour m'accompagner sur la paillage, mais elles ont terminé par devenir des amies en m'orientant dans toutes mes activités malgré leur calendrier très chargé. Vous m'avez donné la possibilité de m'affirmer et de découvrir des perspectives scientifiques et techniques que je pourrai mettre au service de mon pays. Merci à vous!

J'adresse mes remerciements à toute l'équipe du laboratoire d'immunologie à sa tête Mr Frédéric BOUDARD, maître de conférences à la faculté de pharmacie de l'Université de Montpellier sans oublier sa technicienne pour leur disponibilité indéfectible.

Merci à Mr Dominique PALLET et à toute son équipe à la direction de l'UMR Qualisud pour leur accompagnement administratif et managérial.

Je remercie l'équipe administrative et technique de l'ED GAIA pour leur professionnalisme.

Merci à la direction générale de l'Institut supérieur des Sciences et de Médecine Vétérinaire (ISSMV) de Dalaba, sous la coordination de Pr Youssouf SIDIME. Vous avez été un bon manager pour me permettre d'être à ce niveau de performance. A travers vous, je dis merci à tous mes collègues enseignants-chercheurs de cette école de haut niveau. Encore merci à vous! Permettez-moi de citer singulièrement mon ami intime Dr Lancéi KABA, doctorant à l'Universite Aix Marseille/France pour son coaching. Il m'a été utile. Merci Boh! Je n'oublie pas du tout les autres amis, Dr Cécé Félix LAMAH, Mr Mamadou Lamarana SOUARE, Mr Amadou SIDIBE, Mr Mohamed Bolly CAMARA, Dr Daouda KONATE, Dr Pé 2 GOUMOU, Dr Noumouké KANTE, Mr Sâa Moussa KAMANO, Sâa André TOLNO pour leurs conseils et assistances à ma famille. Vous m'avez toujours donné votre amitié gratuitement, merci!

Je tiens à remercier du fond de mon coeur, mes parents, ma famille toute entière qui m'a toujours accompagnée et soutenue. Je pense particulièrement à mes frères et soeurs pour leur générosité et leur discernement. Vous m'avez manqué pendant tous mes séjours en France.

Je remercie ma tendre épouse Mama Aissata FOFANA pour sa patience, son amour et son conseil qui m'ont encouragés à tenir ce laborieux travail. A ces mots, je joins mes aimables enfants Sékouba, Aminata et NfaMory, qui se sont contentés de mes images et videos pendant mes périodes de travail en France durant 3 ans. Vous avez été tenaces pour permettre à Papa de découvrir le monde scientifique. Al ni ké! Je vous informe que c'est terminé. Merci, je vous aime bien.

Je n'oublie pas de dire merci tout simplement à mon frère compatriote Aly MARA, étudiant à l'Université Paul VALERY, Montpellier. Merci frère!

Je remercie infinimement la direction générale de l'agroindustrie Tropicaux qui m'a fait confiance pour me récruter comme Directeur des opérations de l'entreprise malgré mes charges à l'ED. Merci DG. Nous aboutirons à la performance souhaitée!

C'est l'un des moments les plus précieux pour moi de rendre hommage à mon père et à ma mère, qui malgré de multiples efforts pour me rendre heureux n'ont pas eu la chance de partager cette période avec moi. Vos conseils, aides, remarques, critiques et suggestions m'ont permis d'avancer. Je vous en félicite. Je vous dédie mes réussites passées et à venir. Votre fils a tenu bon. Très certainement, il a atteint l'objectif que vous vous étiez fixés pour sa réussite. Puisse Dieu vous pardonner en vous accordant son bonheur éternel. Amen!

Je n'oublie pas ma grand mère Djéfadima CONDE, qui m'a aimé et bénie. Votre mari que vous qualifié de muet a appris à parler et à apprendre la science. Puisse Dieu vous pardonner tous. Al ni ké!A travers vous, mes pensées maternelles à vos enfants Saran KOUYATE, Gnamakoro KOUYATE, Sora KOUYATE, Saran Mady KOUYATE, tous décédés. Votre grand frère Djéfadima Mady m'a été utile. Puisse vous accorder son paradis celeste. Amen!

Mes remerciements les plus respectueux à ma belle famille à Baro, prefecture de Kouroussa, République de Guinée. Vous m'avez été chers pour tenir ce travail. Merci!

3- Tables des matières

Sommaire

Resumé 2

Abstract 3

Tables des matières 7

Publication et communication 11

Liste des abréviations 12

Commonwealth Scientific and Industrial Research 13

Chrome 13

Cuivre 14

Food and Drug Administration 14

Painful Bladder Syndrome 17

Prostaglandine 17

Single nucleotide polymorphisms 17

Ultra High Performance Liquid Chromatography 18

Liste des figures 19

Liste des tableaux 23

Introduction 24

Chapitre I. Généralités sur la banane 27

1. Origine, diversité génétique et production mondiale 27

2. Classification 29

2. Description botanique 30

a) Système racinaire 30

b) Pseudo-tronc 31

d) Inflorescences 32

e) Fruits 33

- Structure de la banane 33

3. Culture 34

4. Physiologie de la banane 36

a) Pré-récolte 36

b) Post-récolte 38

5. Physico-chimie du bananier 40

a) Hampe 40

b) Feuilles 40

c) Fleur et bractées 41

6. Composition physico-chimique de la banane et du plantain 41

a) Amidon et sucres solubles 42

- Amidon résistant (AR) 43

b) Lipides 44

c) Protéines et acides aminés 49

d) Amines bioactives 51

e) Polyphénols et composés phénoliques 53

f. Minéraux 60

g. Vitamines 61

h. Composés volatiles et aromatiques 62

i. Fibres alimentaires 64

7. Usages ethnobotaniques 66

8. Usages industriels 67

9. Usages alimentaires 67

Chapitre 2: Propriétés biologiques de la banane 69

1. Propriétés anti-oxydantes 69

1.1 Radicaux libres 70

1.2 Formation des radicaux libres 70

1.3 Cas particulier de l'oxygène 71

1.4 Principales espèces réactives de l'oxygène (ROS) 72

1.5 Espèces reactives à l'azote (RNS) 73

1.6 Mécanisme du stress oxydatif 74

1.7 Systèmes de défense contre le stress oxydant 75

1.8 Molécules antioxydantes 75

1.9 Pouvoir antioxydant 79

1.10 Intérêts des actifs anti-oxydants de la banane 79

1.11 Méthodes de dosage de l'activité antioxydante 81

1.12 Mitochondries et le statut antioxydant 85

a) Structure 85

b) Protéines médiatrices des phénomènes de fission et de fusion des mitochondries 87

c) Mitochondrie et la production des ROS 89

d) Evaluation du statut antioxydant des Mitochondries 90

2. Propriétés anti-inflammatoires 93

2.1 Généralités sur les inflammations 93

2.2 Médiateurs de l'inflammation 95

2.4 Types d'inflammation 104

2.5 Anti-inflammatoires 105

1. Préparation de l'extrait sec de banane cavendish et plantain de Guinée 111

1.1 Récolte des biomasses et préparation des échantillons 111

b) Méthode ORAC 120

c) Méthode de Mitotracker (marquage mitochondrial) 120

1.4 Evaluation de l'activité anti-inflammatoire 122

1. Extraction et rendement d'extraction des échantillons 126

2. Dosage des polyphénols totaux (TPC) 127

3. Evaluation des activités antioxydantes 129

4. Evaluation des activités anti-inflammatoires 135

1. Extraction 141

2. Dosage des polyphénols totaux (TPC) 142

3. Evaluation des activités antioxydantes 145

4. Activité anti-inflammatoire 149

BIBLIOGRAPHIE 157

4- Publication et communication

Publication



MDPI

Article

Comparative evaluation of the antioxidant and anti-inflammatory properties of *Musa cavendish* and *Musa paradisiaca* pulp and peel extracts from Guinea

Mamady Diawara [1], Imane Boukhers [1], Orianne Duchamp [1], Karine Portet [1], Sylvie Morel [2], Frederic Boudard [1], Manon Vitou [2], Lounseny Traore [3], Alain Michel [1], Patrick Poucheret [1]*

Communication affichée

Potentiel antioxydant des bananes cavendish et plantain de Guinée



Toulouse, le 6 Avril 2021

ATTESTATION DE PRESENCE
ICEPS CONFERENCE
9e Congrès International & Salon des INM

Le comité d'organisation certifie que

Mamady DIAWARA
Ecole Doctorale GAIA, UMR Qualisud

5- Liste des abréviations

ABREVIATIONS	SIGNIFICATION
AAPH	2,2'-azobis(2-amidinopropane)dihydrochloride
AA, BB	Espèces diploïdes
AAA, AAB, ABB	Espèces triploïdes
ABBB	Espèces tétraploides
ABTS	2,2'-azino-bis-(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonate)
AGE	Advanced Glycation Endproducts
Al	Aluminium
ALE	Advanced Lipoxidation Endproducts
AGS	Acide Gras Saturé
ADN	Acide DésoxyriboNucléique
AFLP	Amplified fragment length polymorphism
AFM	Association française contre les myopathies
AIN	Anti-inflammatoire Naturel
AINS	Anti-inflammatoire Non Stéroïdienne
AIS	Anti-inflammatoire Stéroïdien
ALAT	ALAT Alanine amino-transférase
ANOVA	Analysis of variance
AR	Amidon Résistant
ASAT	Aspartate amino transférase
ATP	Adénosine-TriphosPhate
AVC	Accident vasculaire cérébral

BAAE	Butanol-Acetate d'éthyl-Acide acétique-Eau
BAE	Butanol-Acetate d'éthyl-Eau
BHA	Butyl-hydroxy-anisole
BHQ	Buty-hydroxy-quinone
BHT	Buty-hydroxy-toluène
CAT	Catalase
CCL-20	Chemokine ligand 20
CEASA	Center for Excellence in Accounting and Security Analysis
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
COOH	Acide carboxylique
COV	Composés Organiques Volatils
COVID-19	Coronavirus disease-19
COX	Cyclooxygenase
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
CRAG	Centre de Recherche Agronomique de Guinée
CRAK	Centre de Recherche Agronomique de Kindia
COX	Cyclo-oxygénases
CRP	C-Reactive Protein
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research
Cr	Chrome

Cu	Cuivre
DAD	Diode Array Detector
DAMP	Damage-Associated Molecular Pattern
DC	Dendritic cell
DDT	Dichlorodiphényltrichloroéthane
DG	Direction Générale
DHA	Acide docosahexaénoïque
DMSO	Diméthylsulphoxyde
DNA	Deoxyribonucleic acid
DPPH	2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle
DSRP	Document de stratégie pour la réduction de la pauvreté
DW	Dry weight
EAG	Equivalent Acide Gallique
ELISA	Enzym-Linked Immunosorbent Assay
ERO	Espèce Réactive de l'Oxygène
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation
FAOSTAD	Statistiques de la FAO
FAOSTAT	Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation/Statistique
FC	Folin Ciocalteu
FDA	Food and Drug Administration
Fe	Fer

FHIA	Honduras Foundation for Agricultural Research
FLHORBAN	Hybride de bananier synthétique
FRAP	Ferric Reducing Antioxidant Power
FW	French Weight
GAE	Equivalent d'Acide Gallique
GAG	Glycosaminoglycans
GPx	Glutathions peroxydases
GTP	Guanosine-5′-triphosphate
HAE	Hereditary angioedema
HAT	Hydrogen Atom Transfert
HBSS	Hank's Balanced Salt Solution
HDL	Hight Density Lipoprotein
IC 50%	Concentration Inhibitrice de 50% de l'activité
IkB	Inhibitor kappa B
IL-6	Interleuine-6
iNOS	Oxyde Nitrique Synthétase inductible
IDF	International Diabetes Federation
IFN	Interféron
IMM	Inner mitochondrial membrane
INRA	Institut national de la nstitute agronomique
ISEA	Institute Supérieur d'Expertise et d'Audit
ISSMV	Institut Supérieur des Sciences et de

	Médecine Vétérinaire
ISSN	International Standard Serial Number
ITC	International Trade Centre
JC	Jesus Christ
K	Potassium
kJ	Kilojoules
LDCL	Low-density lipoprotein Cholesterol
LDL	Low-density lipoprotein
LED	Light-Emitting Diode
LPS	Lipopolysaccharide
MC	Musa cavendish
Mf1	Mitofusine 1
Mf2	Mitofusine 2
MP	Musa paradisiaca
MMP	Métalloprotéinases matricielles
Mn	Manganèse
NADH	Nicotinamide Adénine Dinucléotide
NADPH	Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate
NO	Oxyde Nitrique
NOS	NO synthase
O2 *	Anion superoxyde
OH *	Radical hydroxyle
ONOO-	Anion peroxinitrite
OMM	Outer mitochondrial membrane

ORAC	Oxygen Radical Absorbance Capacity
OPA1	Atrophie optique 1
P	Phosphore
PAF	Platelet activating factor
PAMP	Pathogen-Associated Molecular Pattern
PARP	Poly (ADP-ribose) polymerase
PBS	Painful Bladder Syndrome
PG	Prostaglandine
PGE	Prostaglandine E
PMN	Polymorphonuclear neutrophils
PRR	Pattern recognition receptors
RNS	Reactive Nitrogen Species
RIA	Radioimmunoessay
ROS	Reactive oxygen species
RPMI	Roswell Park Memorial Institute
RSC	Royal Society of Chemistry
SARS	Severe acute respiratory syndrome
SDF	Soluble dietary fiber
Se	Selenium
SEM	Erreur standard de la moyenne
SET	Single Electron Transfert
SIDA	Syndrome de l'immunodéficience acquise
SNP	Single nucleotide polymorphisms
SOD	Superoxyde dismutase

SPR	Surface Plasmon Resonance
TAG	Triacylglycérols
TDF	Total Dietary fiber
TEAC	Trolox equivalent antioxidant capacity
TE	Equivalent Trolox
TLR	Toll like receptors
TNF	Tumor Necrosis Factor
TPC	Total polyphenol content
TPP+	Ion triphénylphosphonium
UHPLC	Ultra High Performance Liquid Chromatography
USA	United States of America
UV	Ultra violet
VIH	Virus de l'immunodéficience humaine
WCA	World Cube Association
Zn	Zinc

6- Liste des figures

Figure 1: Représentation de l'organisation du bananier (Champion, 1963)..... 27

Figure 2: Production mondiale de bananes par année (FAOSTAT, 2013) 28

Figure 3: Les dix premiers pays de l'année de production bananière en 2012 (FAOSTAT, 2012). 29

Figure 4: Les dix premiers pays de l'année de production bananière en 2012 (FAOSTAT, 2012). 29

Figure 5: Un plant du genre Ensete: Ensete superbum (Roxb.) Cheesman et ses graines noires (Setiya et al., 2019) 30

Figure 6: Rhizome du Bananier 31

Figure 7: Faux tronc du bananier 31

Figure 8: Feuille du bananier 32

Figure 9: Inflorescences du bananier 33

Figure 10: Présentation des bananes sur le bananier (Champion, 1963) 33

Figure 11: Structure morphologique et anatomique de la banane..... 34

Figure 12: Une bananeraie (FAOSTAD, 2018)..... 35

Figure 13: Régimes de banane recouverts de polyethylene (Emaga et al., 2007) 36

Figure 14: Récolte de la banane (gauche) et Souche de pseudo-tronc coupée (droite) 37

Figure 15: Stades d'évolution de la banane en période post récolte (Emaga et al., 2007) 39

Figure 16: Granules d'amidon extraits de bananes vertes (à gauche) et de bananes mûres (à droite) (Fernanda et al., 2015) 43

Figure 17: Schéma représentant les triglycérides 45

Figure 18: Schéma représentant les phospholipides 45

Figure 19: Schéma représentant des acides gras saturés (acide palmitique et acide stéarique) (Oliveira et al., 2006) 46

Figure 20: Les acides gras (exemples d'acide gras saturés, insaturés et poly-insaturés) (Sheng et al., 2010). 46

Figure 21: Noyau d'ester et celui du stérol libre (Oliveira et al., 2008) 47

Figure 22: Principaux stérols d'un bananier (Oliveira et al., 2008)..... 48

Figure 23: Principaux triterpènes présents dans le bananier (Oliveira et al., 2008). 48

Figure 24: Squelette des tocophérols du bananier bien distinct de celle des tocotriénols (Knapp et al., 1969). 49

Figure 25: Evolution des teneurs d'amines bioactives sous l'effet de la maturation et de la température (Borges et al., 2019). 52

Figure 26: Structure du noyau phénol (Sarni-Manchad et Cheynier, 2006) 54

Figure 27: Structures chimiques des acides hydroxybenzoïques (Bruneton, 2008). 55

Figure 28: Structures chimiques des acides hydroxycinnamiques (Han et al., 2007; Chira et al., 2008). 55

Figure 29: Squelette de base des flavonoïdes (Crozier, 2003). 56

Figure 30: Structure chimique de flavonols (Crozier, 2003). 57

Figure 31: Effets des extraits de banane sur l'auto-oxydation lipidique (Someya et al., 2002). 57

Figure 32: Structure chimique de quelques flavan-3-ols (Chira et al., 2008). 58

Figure 33: Structure chimique de quelques anthocyanidines courantes (Han et al., 2007; Chira et al., 2008). 58

Figure 34: Structure chimique (a) d'un tanin condensé (proanthocyanidine) et (b) d'un gallotanin (1,2,3-tri-O-galloyl-β-D-glucose) (Derbel et Ghedira, 2005). 59

Figure 35: Photographie montrant de la pulpe de banane à faible teneur (FHIA 25) et riche en vitamine A (Kokopo)(Fungo et Pillay, 2011). 62

Figure 36: Les activités biologiques connues de la banane 69

Figure 37: Principales espèces réactives de l'oxygène (Debydupont et al., 2002) 73

Figure 38: Structure chimique du Trolox 81

Figure 39: Structure de la mitochondrie et fonctionnement de la chaîne respiratoire et de la phosphorylation oxydative (Farhat, 2015). 87

Figure 40: Phénomènes de fusion et de fission de la membrane externe michondriale chez les mammifères (van der Bliek, 2013). 88

Figure 41: Représentation des éléments structuraux des protéines de fusion et leurs modifications post-traductionnelles (Garone et al., 2018). 88

Figure 42: Représentation des éléments structuraux des protéines de fission et leurs modifications post-traductionnelles (Garone et al., 2018). 88

Figure 43: Sites et mécanisme de la fuite d'électrons (Jastroch et al., 2010). 90

Figure 44: Illustration schématique de la cytométrie en flux basée sur MitoSOX pour la détection de ROS / superoxyde mitochondrial. La charge positive de MitoSOX est responsable de son accumulation intra-mitochondrial (Kauffman et al., 2016). 92

Figure 45: Illustration de la méthode de détection des ROS par imagerie des cellules mitochondriales par utilisation de MitoSOX (Roelofs et al., 2015) 92

Figure 46: Causes, réponses physiologiques et conséquences pathologiques de l'inflammation (Medzhitov, 2008) 94

Figure 47: Interactions entre les cytokines de l'inflammation (Miossec, 2020). 97

Figure 48: Les cytokines anti et pro-inflammatoires (Danièle, 2012) 98

Figure 49: Mécanismes de synthèse des IgE et de la libération de l'histamine (Jamet et al., 2006)..... 101

Figure 50: Synthèse des médiateurs lipidiques (Shimizu, 2009; Danièle, 2012) 102

Figure 51: Récolte des biomasses et préparation des échantillons 111

Figure 52: Lyophilisation des pelures et de pulpes à gauche et pulpes caramélisées à droite 112

Figure 53: Pesée et broyage des bananes lyophilisées 112

Figure 54: Délipidation au Soxhelet et pelure de banane délipidée.....113

Figure 55: Macération sous la hotte 114

Figure 56: Centrifugeuse.....114

Figure 57: Filtration à l'aide d'une pompe à vide.....115

Figure 58: Elimination de l'éthanol des extraits hydroalcooliques.....115

Figure 59: Lyophilisation des extraits hydroalcooliques et extraits secs conditionnés.....116

Figure 60: Diagramme d'extraction des extraits bruts.....116

Figure 61: Droite d'étalonnage TPC 117

Figure 62: Droite d'étalonnage de la méthode DPPH.....119

Figure 63: Dosage des teneurs en polyphénols totaux (TPC) des extraits..... 129

Figure 64: Capacité antioxydante des extraits par la méthode DPPH 131

Figure 65: Capacité antioxydante des extraits par la méthode ORAC 132

Figure 66: Cellule témoin sans traitement (ni LPS/IFN, ni extrait de banane)..... 133

Figure 67: Cellules stimulées par LPS/IFN 133

Figure 68: Cellules traitées avec les extraits de pulpe de plantain + LPS/IFN..... 134

Figure 69: Cellules traitées avec les extraits de pulpe de cavendish + LPS/IFN..... 134

Figure 70: Histogramme du marquage mitochondrial 135

Figure 71: Histogramme d'inhibition du NO 137

Figure 72: Histogramme d'inhibition du NO scavenging 138

7- Liste des tableaux

Tableau 1: Teneur en amidon, amylose et amylopectine dans la farine de huit variétés de bananes différentes (de Mota et al., 2000) 44

Tableau 2: Teneur en acides aminés (source: FAO 1991) 50

Tableau 3: Teneur en amines bioactives (mg / 100g ps) dans la peau de différents génotypes de Musa spp (Borges et al., 2019). 52

Tableau 4: Teneur en amines bioactives (mg / 100g ps) dans la pulpe de différents génotypes de Musa spp (Borges et al., 2019). 53

Tableau 5: Contenu phénolique total et activité antioxydante des échantillons de farine de banane (Haslinda et al., 2009). 60

Tableau 6: Teneur en minéraux des échantillons de farine de banane (mg/100 g de matière sèche) (Haslinda et al., 2009). 61

Tableau 7: Quelques composés volatils dans la pulpe de deux variétés de bananes, FLHORBAN 920 et Grande Naine, pendant le mûrissement (Bugaud et al., 2009) 64

Tableau 8: Composition en fibres alimentaires de la farine de différentes variétés de banane à différents stades de maturité (Ramli et al., 2009)..... 65

Tableau 9 : Total de fibre alimentaire (TDF) des échantillons de farine de banane (g/100 g de matière sèche) (Ramli et al., 2009). 65

Tableau 10: Description de quelques tests antioxydants in vitro chimiques..... 82

Tableau 11: Description de quelques tests in vitro biologiques 83

Tableau 12: Résultats de l'extraction 127

Tableau 13: Résultats du dosage des TPC des extraits analysés 128

Tableau 14: Résultats d'évaluation des activités antioxydantes des extraits selon DPPH et ORAC.... 131

Tableau 15: Dosage du NO 136

Introduction

La banane de manière générale est un fruit de grande consommation dans les pays du sud et du nord. Elle est l'un des fruits les plus populaires, les moins chers et les plus abordables. Elle est classée quatrième produit agricole après le riz, le blé et le maïs, en terme de production mondiale (Fatma et Mohammad, 2018). La banane représente la première production agricole des Antilles françaises (298 000 T en 2011) (Bruno, 2012). Cette ressource agricole est peu transformée et presque exclusivement destinée à la consommation humaine.

En Guinée sa consommation à l'état frais ou cuit est courante par toutes les couches socio-professionnelles (ITC, 2018).

Partout ses propriétés nutritionnelles et fonctionnelles sont appréciées par les populations. Mais face aux enjeux d'urbanisation, de changements de modes de vie des populations, l'intensification des échanges internationaux avec l'introduction des normes dans les systèmes alimentaires, la demande en aliments croit rapidement. Ce qui amène à des nouvelles exigences des consommateurs face aux différentes agro-ressources. Dans cette évolution du régime alimentaire, des complications liées à la santé peuvent être constatées. Par conséquent les formulations alimentaire et thérapeutique doivent s'adapter (CIRAD, 2001).

La banane renferme de multiples composés bioactifs (composés phénoliques, caroténoïdes, amines biogènes et les phytostérols), qui sont beaucoup sollicités dans l'alimentation. Ces métabolites exercent de nombreux effets positifs sur la santé et le bien-être de l'homme car ils possèdent des activités antioxydantes et sont efficaces pour protéger le corps contre divers stress oxydatifs (Amini *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2016), le syndrome inflammatoire, les maladies cardio-vasculaires, le diabète, etc (Blé-Castillo, 2010). Pendant des siècles, ces bioactifs notamment la dopamine ont été utilisés par des civilisations pour promouvoir et améliorer la santé.

Traditionnellement la banane est utilisée pour traiter la digestion, la constipation et la diarrhée (Fatma et Mohammad, 2018; Rabbani 2010).

Par ailleurs, il faut remarquer que son contenu si riche en éléments bioactifs peut bien être affecté par des procedés de transformation impliquant des traitements thermiques qui peuvent réduire les taux de dopamine, de sérotonine, d'histamine et de tyramine dans la pelure et dans la pulpe de banane

(Alkarkhi *et al.*, 2011; Cristine *et al.*, 2019). En plus des multiples procédés de transformation et d'extraction, les pratiques agricoles et les phases de croissance peuvent également influencer sa composition et le potentiel d'activités biologiques. Il serait intéressant d'améliorer ou de proposer des procédés d'extraction adaptés pouvant produire des extraits de bonne qualité nutritionnelle à effet santé satisfaisant. Dans le present travail, il était question de produire des extraits secs, tester leur activité biologiques *in vitro*. Cette démarche intégrée basée sur des procédés d'extraction permettra d'obtenir des extraits secs actifs, vise à comprendre le mécanisme d'action des bioactifs dans les bananes de Guinée. Ce travail contribuerait à valoriser les effets santé de la banane contre le syndrome métabolique par production d'extraits riches en composés bioactifs. Sur cette base, les activités biologiques seront explorées. Sa teneur en bioactifs comme les éléments minéraux, les oligoélements et les vitamins, etc sont fortement indexés pour attribuer à la banane sa valeur alimentaires et thérapeutiques. Plusieurs études montrent la richesse de cette herbe géante en minéraux comme par exemple le potassium. Son fruit possède une capacité antioxydante élevée dûe aux composés phénoliques qui le composent. La dopamine, molécule appartenant à la famille des catécholamines, et la vitamine C accentuent ce potentiel. Il serait idéal que des études plus approfondies soient réalisées pour determiner sa richesse tout en comprenant la biodisponibilité de ces bioactifs

De manière spécifique, cette présente thèse est construite sur:

- La maitrise d'un procédé d'extraction permettant d'optimiser les actifs biologiques;
- L'évaluation de la richesse des bananes de Guinée en polyphénols totaux;
- La réalisation et la comprehension des tests de validation des propriétés antioxydante et anti-inflammatoire comme DPPH, ORAC, Mitotracker, le dosage du NO.

L'originalité de ces travaux de recherche, en outre sa transversalité, c'est son caractère pluridisciplinaire associant des compétences dans le domaine du procédé et de la nutrition-santé pour une mise en valeur de l'agroressource banane de Guinée, source non exploitée de composés bioactifs.

Première partie: Bibliographie et état de l'art sur le sujet de thèse

8- Chapitre I. Généralités sur la banane

9- Origine, diversité génétique et production mondiale

Les bananes cultivées proviennent des îles de l'Asie du Sud-Est (ISEA)(Anhwange, 2008). La plus ancienne trace fossile de bananiers date de l'ère tertiaire en Inde. Toutes ces bananes cultivées sont domestiquées à partir de la famille des Musaceae par le biais de multiples hybridations intra et inter espèces. A ce jour, on dénombre près de 60 espèces de caractéristiques proches et plus de 1000 cultivars et variétés de bananiers dans le monde. Les espèces non comestibles se reproduisent par la voie sexuée dont les fruits peuvent contenir plusieurs graines bien fertiles. Parfois, ces mêmes espèces peuvent également se reproduire de manière asexuée (bourgeonnement). Par contre, les bananiers cultivés produisent des fruits sans pépins (parthénocarpie), qui est une forme de multiplication végétative (Pua et Davery, 2007; Heslop-Harrison et Schwarzacher, 2007; Anhwange *et al.*, 2009; Li et *al.*, 2013). Les cultivars actuellement comestibles sont des descendants de 2 espèces ancestrales de *Musa* sauvages, *Musa acuminata* (AA, 2n = 22) et *Musa balbisiana* (BB, 2n = 22) (Simmonds, 1962), qui se sont diversifiés en plusieurs variétés comestibles renfermant des diploïdes (AA, BB), des triploïdes (AAA, AAB, ABB) et des tétraploïdes (ABBB) (Perrier et *al.*, 2011).

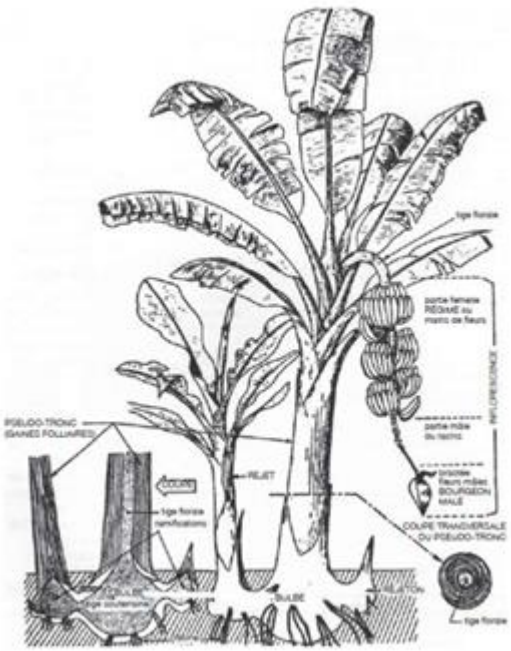


Figure 1: Représentation de l'organisation du bananier (Champion, 1963)

De manière générale, les bananes et les plantains du genre *Musa* collectivement appelés bananes cultivées sont des herbes géantes monocotylédones. Elles sont mieux adaptées aux régions tropicales et subtropicales du monde et constituent un aliment de base des millions de personnes dans les pays en voie de développement (Denham et *al*., 2003; Pua et Davery, 2007; Fatma, 2018).

Ils constituent la quatrième culture au monde après le riz, le blé et le maïs (Nelson *et al.*, 2006; Lassoudière et *al.*, 2007; Lin-Feng et Xue-Jun, 2017). La banane représente 16,8% de la production mondiale de fruits, suivie de la pomme et de l'orange, avec 11,4% (FAOSTAT, 2013). La production bananière dans le monde a augmenté régulièrement au cours des 20 dernières années, passant de près de 46 millions de tonnes en 1993 à environ 105 millions de tonnes en 2013. L'Asie est restée le premier continent producteur de bananes avec environ 57,3% de la production mondiale totale, suivie par les Amériques, puis l'Afrique. L'Océanie et l'Europe possèdent la plus faible production, avec environ 0,3% de la production mondiale totale (FAOSTAT, 2013). A l'origine de l'augmentation de la production de bananes, il est fort probable que c'est la croissance démographique qui fait accroitre la demande. En plus, il faut citer l'augmentation de la superficie cultivée et l'amélioration de la productivité.

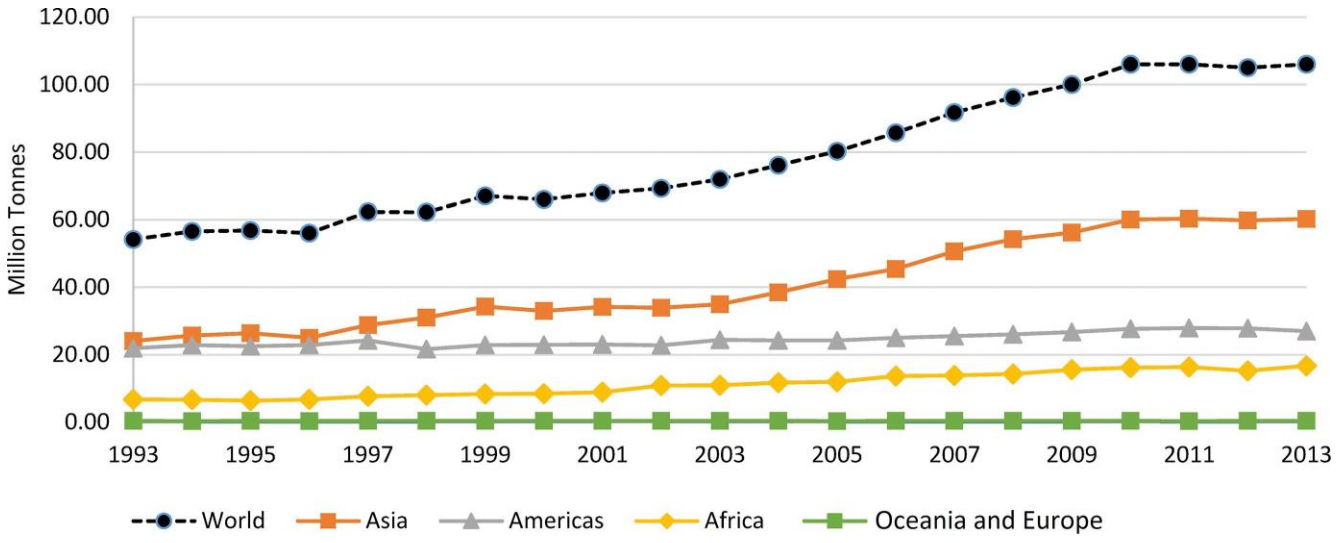


Figure 2: Production mondiale de bananes par année (FAOSTAT, 2013)

L'Inde occupe le premier rang avec une superficie cultivée de 722 000 ha et une production annuelle de 26,51 millions de tonnes, suivit par la Chine, les Philippines, l'Équateur, le Brésil. En 2015, le niveau de production mondiale annuelle atteignait environ 118 millions de tonnes (Vilhena, 2019) alors qu'elle

était estimée à 90,7 millions de tonnes en 2009 par FAO. En général, la tendance de la production de bananes est à la hausse (FAOSTAT, 2014). La peau de banane (représentant 35% de la banane entière) est estimée à 36 millions de tonnes produites par an (Vu *et al.* 2017), pouvant avoir une utilisation ultérieure mais généralement jetée dans les décharges ou avec les déchets généraux (Schieber *et al.*, 2001).

Dans le monde, la banane est le fruit le plus produit et le plus exporté. La variété Cavendish reste la plus connue et la plus consommée. La France (Guadeloupe et Martinique) et l'Espagne (îles Canaries) sont les plus gros producteurs de bananes en Europe, avec moins de 1 million de tonnes produites par an. En Guadeloupe et en Martinique, la production de banane a commencé depuis le 20 ème siècle. Aujourd'hui la culture bananière dans ces pays occupe 2453 à 6398 ha (FAO, 2014). En Afrique de l'Ouest, le bananier a été propagé par les commerçants il y a à peu près 2500 ans (Mbida Mindzie. et *al*, 2001). Malheureusement les pertes pendant la production de bananes peuvent atteindre 40% du total. Cela est surtout lié à leur nature hautement périssable et à leur manutention insuffisante après récolte (FAO, 2012). De plus, les bananes douces et plantains sont vulnérables aux facteurs de stress biotiques et abiotiques limitant leur production. Face à cette vulnérabilité, l'amélioration génétique de cette culture afin d'améliorer la qualité des éléments nutritifs et de mieux s'adapter aux conditions environnementales changeantes est de plus en plus pratiquée. Cela produit de nouvelles variétés résistantes aux maladies et facteurs environnementaux (Ghag & Ganapathi, 2017).

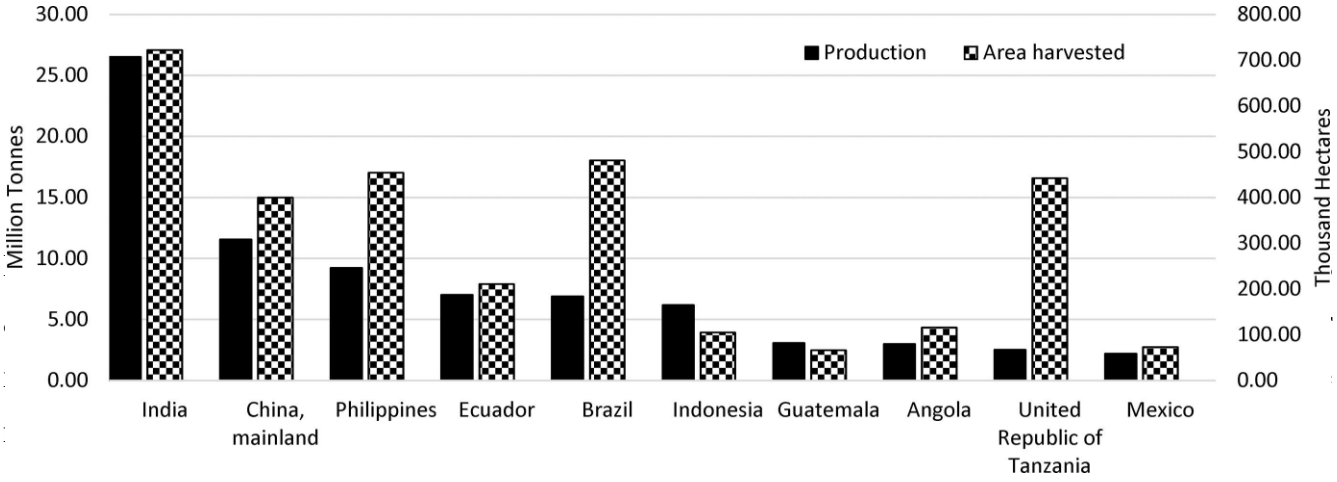


Figure 4: Les dix premiers pays de l'année de production bananière en 2012 (FAOSTAT, 2012).

Tous les bananiers sont de la famille des Musaceae qui comprend 3 genres botaniques: (i) *Musella*, très peu représentés et localisés en Asie, (ii) Ensete, ne comportant pas d'espèces parthénocarpiques et (iii)

le genre *Musa*. Par ailleurs, il est reconnu que le genre *Musa* est de loin le plus répandu et le plus diversifié, se caractérisant par des inflorescences avec des bractées insérées séparément sur des fleurs, à l'inverse du genre *Ensete* (Lassois et *al.*, 2009). Le genre *Musa* contient 4 sections qui se distinguent par leur nombre de chromosomes et des caractéristiques morphologiques: *Australimusa* (n=10); *Callimusa* (n=10) ; *Rhodochlamys* (n=11) et *Eumusa* (n=11) avec 10 à 12 espèces qui constituent le genre le plus diversifié et comprend plus de 1000 variétés dont les plantains (Cheesman, 1947, cité par Heslop-Harrison, 2007; Lassoudière, 2007). Selon une étude basée sur l'AFLP (*Amplified fragment length polymorphism*), le genre *Musa* pourrait être réduit de 4 à 2 groupes. Les auteurs disent qu'on pourrait bien regrouper les *Rhodochlamys* avec les *Eumusa* et les *Australimusa* avec les *Callimusa* (Wong *et al*., 2002).



Figure 5: Un plant du genre Ensete: Ensete superbum (Roxb.) Cheesman et ses graines noires (Setiya *et al.*, 2019)

2- Description botanique

a) Système racinaire

C'est une souche souterraine vivace, globuleuse (0,30 à 0,60m de diamètre) appelée aussi rhizome ou bulbe, d'où naissent de longues feuilles, riches en méristèmes, de dimensions croissantes. Sa strucutre anatomique ne présente pas de formation vasculaire secondaire, ce qui ne favorise pas sa croissance en épaisseur (Lassoudière, 2010).



Figure 6: Rhizome du Bananier

b) Pseudo-tronc

Le bananier est une herbe géante dont la taille varie de 1,50 à 8m selon les espèces. Le pseudo tronc est formé par des gaines naissantes du rhizome ou bulbe qui s'imbriquent, de par une phyllotaxie spirale, formant ainsi cette fausse tige ou faux tronc. La vraie tige se développe à l'intérieur du faux tronc. La croissance interne se réalise durant environ 3 mois. C'est au cours de cette croissance interne que les dernières feuilles différenciées sortent extérieurement (une feuille par semaine), puis le bourgeon floral sort (c'est la phase de floraison). La vie d'une tige peut aller de 10 - 14 mois. Grâce à la succession végétative, une bananeraie peut durer des dizaines d'années (Lassoudière, 2010).



Figure 7: Faux tronc du bananier

c) Feuilles

La feuille est un organe végétal produite par un méristème situé dans la zone apicale du jeune pseudo tronc. Le méristème apical du pseudo tronc donne une serie de feuilles dont le nombre varie de 20 à 30. Les feuilles possèdent une partie basale bien développée appelée gaine foliaire. Les gaines des feuilles imbriquent fortement les unes sur les autres. Pendant le processus de croissance et de développement

des feuilles, ces gaines s'épaississent en petioles et se prolongent en nervure centrale séparant ainsi le vaste limbe de manière souvent symétrique. A l'extremité de chaque gaine, se développe le pétiole qui se prolonge par la nervure centrale et supporte le limbe. Le pétiole est rigide, robuste et apte à supporter le poids important du limbe qui peut avoir 36 à 60 cm de large. Les feuilles sont disposées en spirale. La feuillaison peut prendre 6 à 15 jours suivant des facteurs exogènes de croissance (hydrométrie, température et sol). Le nombre de feuilles est fonction du cultivar et les conditions environnementales (Jones, 2000; Oliveira *et al.*, 2008).

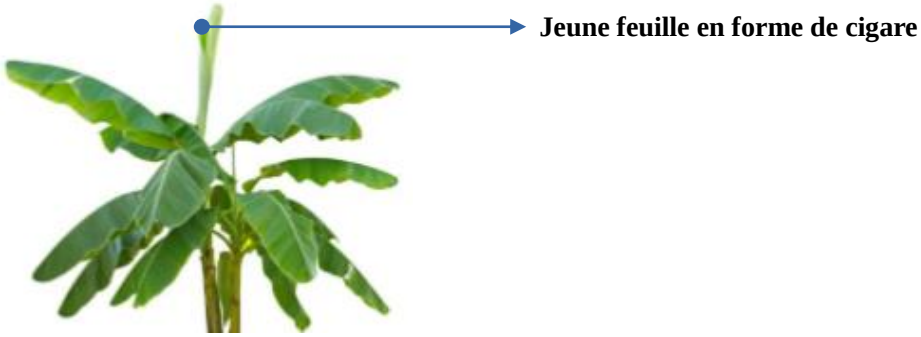


Figure 8: Feuille du bananier

d) Inflorescences

Elles constituent l'ensemble des fleurs. A la naissance de l'inflorescence, il apparait des bractées sous forme de cône violacé orienté d'abord vers le haut puis, suite à la croissance du rachis, vers le bas (géotropisme positif) tout en déployant des gaines violacées. Ces bractées portent à leurs aisselles des doubles rangées de fleurs femelles, c'est des mains de 15 à 22 bananes. Chaque fleur femelle, au terme du développement parthénogénétique de son ovaire, peut donner un «doigt» ou banane qui, à la chute de la bractée, se recourbe vers le haut (géotropisme négatif). Les mains sont ainsi constituées au niveau des noeuds ou double rangée de doigts. Les fleurs mâles restent groupées sur le cône violacé situées à l'extrémité basale de l'inflorescence (Lescot, 2014).

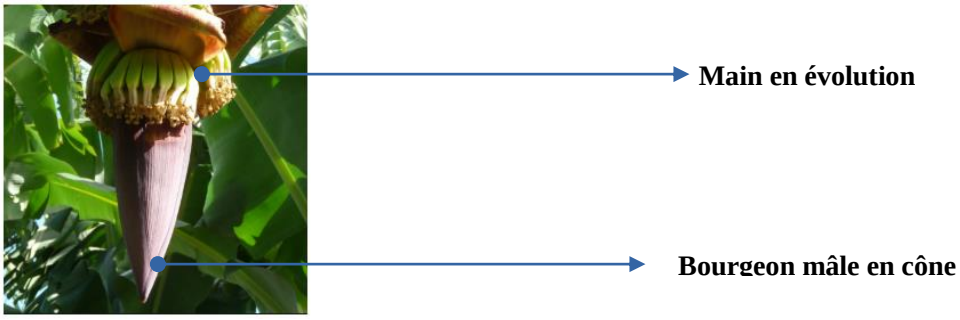


Figure 9: Inflorescences du bananier

e) Fruits

La banane est un fruit charnu, une baie parthénocarpique qui provient d'un ovaire infère, contenant des ovules non fécondées (Lassoudière, 2007).

Le genre *Musa* sur le plan botanique, se divise en 2 grands types: les variétés comestibles à fruits charnus et les espèces sauvages. Ces dernières variétés, séminifères à fruits non comestibles sont toutes diploïdes (AA et BB) et les variétés comestibles donnent des fruits qui sont parthénocarpiques. Les bananes ne diffèrent que par leur disposition ploïdie. La récolte des bananes intervient lorsque les doigts atteignent une croissance diamétrale suffisante avec la disparition des arrêtes (Pech *et al*., 2008; Pereira et Maraschin, 2015).

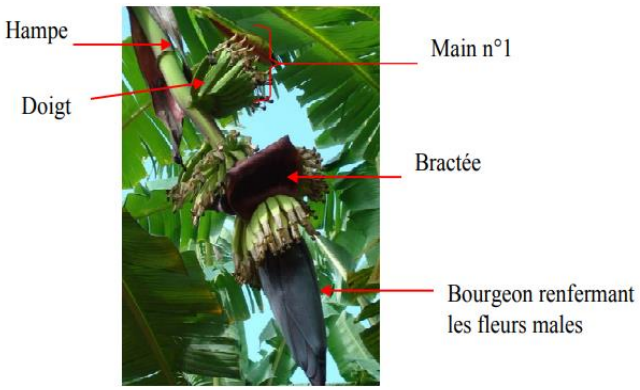


Figure 10: Présentation des bananes sur le bananier (Champion, 1963)

- **Structure de la banane**

La banane est composée de 2 grandes parties:

- une partie externe: c'est la peau de banane ou épicarpe, formée par la soudure du conceptacle et de l'épicarpe légèrement coriace de la fleur. Cette partie assure à la banane sa protection contre des prédateurs (les insectes, les oiseaux, les champignons, etc). Ce rôle de protection est étroitement lié à la structure très serrée des cellules constitutives de l'épicarpe. La peau de banane verte possède un taux élevé de chlorophylle qui se dégrade en carotène sous l'effet des chlorophyllases pendant la maturation.

- une partie charnue (mésocarpe et endocarpe) ou pulpe: elle correspond à la paroi des carpelles. Elle est formée de 3 loges carpellaires qui sont remplies de poils moux amylacés qui contiennent de nombreuses graines non fécondées. Les cellules constitutives sont de nature parenchymateuse et d'autant plus coriaces qu'on s'approche de l'épicarpe et plus lâches au fur et à mesure que l'on se rapproche de la pulpe. D'où la facilitation du clivage Peau-Pulpe lors de l'épluchage (Lassois *et al.*, 2009) (voir figure ci-dessous).

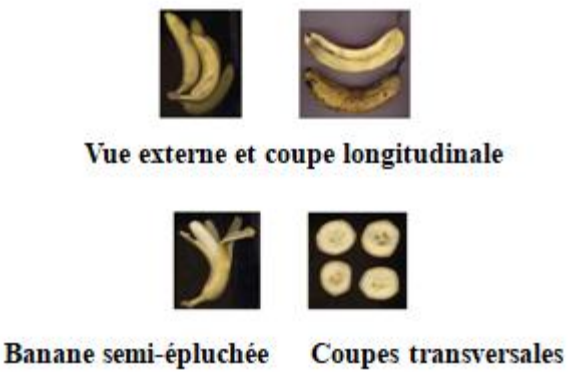


Figure 11: Structure morphologique et anatomique de la banane

(Site web: http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Fruits/banane.htm)

3- Culture

Le bananier est une plante cultivée sous un climat tropical humide, qui apprécie une hygrométrie élevée et un bon ensoleillement tout en craignant les vents et les variations brusques de température. Il apprécie une humidité de l'air se situant entre 60% à 90%. Une bananeraie exige un sol profond d'au moins 60 cm, bien drainé avec une texture légère, une faible perméabilité et un pH optimum de 5,5 à 7,5. Il est très exigeant en éléments nutritifs avec des besoins en azote importants jusqu'à la floraison puis ils diminuent. Quand à ses besoins en potassium, ils sont plus élevés à partir de la différentiation florale qu'en période végétative. L'apport en phosphore est réalisé en amendement avant la plantation et

le magnésium est recommandé tout le long du cycle. Le fumier organique serait mieux indiqué pour la fertilisation d'une bananeraie (Lassoudière, 2007).

La sélection des rejets se fait en phase végétative et le pied-mère doit être indemne de maladies transmissibles comme les viroses et la transplantation sur un sol non infesté par les nématodes. L'oeilletonnage ou l'élimination des rejets indésirables est recommandé avant la floraison du pied-mère. En raison de la croissance démographique, la culture intercalaire banane-légumineuse est beaucoup pratiquée de nos jours (Guedira *et al*., 2004; DSRP, 2005; Ocimati, 2019).



Figure 12: Une bananeraie (FAOSTAD, 2018)

Selon une base de données de la FAOSTAD (2018), la production de banane en 2017 avait atteint 114 millions de tonnes dans le monde. Cette croissance de la production est en relation avec une bonne adaptation de la culture bananière dans les régions tropicales et subtropicales (Carneiro *et al.*, 2013). A préciser que les continents américain et asiatique avaient réalisé le plus grand nombre de production (FAOSTAD, 2018).

4- Physiologie de la banane

a) Pré-récolte

Sur le plan morphologique, les bananes se distinguent les unes des autres par leur forme, leur section transversale, leur longueur et leur apex. Egalement, par la maturité, la couleur de leur pulpe et la présence ou non des grains, on peut bien distinguer les bananes. Elles sont récoltées à partir de la maturité physiologique optimale. A cette phase, l'acquisition de la compétence à répondre à l'éthylène et de pouvoir le synthétiser de manière autocatalytique est rendue possible. Les bananes et des plantains atteignent leur stade de maturité commerciale avec diverses caractéristiques du fruit, qui sont principalement définies par: 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 (Emaga *et al.,* 2007). Les bananes douces et les plantains étant des fruits climactériques, leur maturation serait la cause d'une augmentation de la respiration cumulée à une stimulation rapide de la synthèse d'éthylène (Gamage et Rehman, 1999), l'éthylène ainsi émis par le fruit stimule sa propre production (autocatalyse) (Johnson *et al.,* 1997). Un peu avant la récolte des régimes de banane, il est important de limiter l'effet de variation de la température sur les fruits. Ainsi, le régime est souvent recouvert d'un film de polyéthylène. Il permet de protéger le régime de banane contre les traumatismes ou dommages mécaniques et les parasites.



Figure 13: Régimes de banane recouverts de polyethylene (Emaga *et al.*, 2007)

A la phase de «doigts horizontaux », les agriculteurs procèdent au marquage des régimes en mettant une bande de couleur spécifique qui permet de déterminer la date de récolte en fonction de l'âge du régime. Ils récoltent les bananes à la qualité commerciale située entre 34-36 mm (banane douce) (Bakry *et al.,* 2007; Chillet *et al.,* 2007; Lassois *et al.,* 2009) et le plantain peut mesurer de 30-40 mm (Chillet *et al.,* 2007).

Pendant le processus de maturation, il est également remarqué une augmentation de la teneur en sucre suite à la dégradation de l'amidon sous l'effet des amylases. Les teneurs des acides citrique et malique diminuent suite à leur usage dans les combustions cellulaires ou transformées en sucre par décarboxylation. Ainsi, on observe la synthèse d'arôme due à une activité croissante d'enzymes telles que les estérases capables de former des esters de l'alcool isoamylique (acétate d'isoamyle) (Bugaud *et al*., 2006).

Lorsque les bananes accumulent des températures moyennes journalières de 90 degrés-jours au seuil de 14°C dans les régions basses, les agriculteurs peuvent espérer obtenir cette bonne qualité commerciale (Chillet *et al.,* 2007). Par contre lorsque les agriculteurs se retrouvent dans des conditions stressantes liées au climat, ils procèdent à la récolte des bananes à un âge au délà de 90 degrés-jours. Dans les régions montagneuses, la fermeté de la banane et son contenu intéressant en éthylène sont des caractéristiques qui rendent le fruit plus résistant aux actions mécaniques sur leur pelure (Bugaud *et al.*, 2009). Les degrés-jours permettent de caractériser le développement du bananier ainsi de planifier la récolte à partir de la date de floraison. Généralement, la récolte de la banane se fait entre 90 à 100 jours après la floraison (Jullien *et al.*, 2008; Luyckx *et al*., 2016).

Au moment de la récolte, le pseudo-tronc est abattu. D'après certaines études, pendant cette coupe, la dopamine contenue dans le bananier participe à la senescence post-récolte en combinaison avec d'autres métabolites secondaires comme l'acide gallique, l'acide malique, la valine, etc (Yuan Y., *et al.*, 2016). Par la suite, avec l'existence des bourgeons vivants sur les bulbes, un ou plusieurs rejets peuvent alors prendre le relais et se développer pleinement (Bakry *et al.*, 1984).



Figure 14: Récolte de la banane (gauche) et Souche de pseudo-tronc coupée (droite)

b) Post-récolte

La récolte programmée à l'état vert des bananes, indique que la qualité commerciale est atteinte. Dès après la récolte, elles sont conservées dans des chambres où la température est régulée à 14°C. Ce qui maintient sa couleur et facilite le transport ou l'exportation vers les zones de consommation. Dans les milieux tropicaux, la durée de vie des bananes après la récolte est très courte en raison des changements liés au mûrissement climactérique. Elles peuvent facilement se ramollir sous l'effet de la chaleur, des conditions de transport qui peuvent aboutir à la pourriture et entrainer des pertes économiques (Bapat *et al.,* 2010; Shan *et al.,* 2012; Xiao, 2013). L'intégrité structurale de la paroi cellulaire primaire et de la lamelle moyenne, l'accumulation des polysaccharides de stockage et la pression produite dans les cellules par effet osmotique sont également des paramètres qui peuvent influencer la texture de la banane ou du planatin quelque soit le milieu (Jackman *et al.,* 1995; Xiao, 2013). Quand au changement de la pression et la dégradation de l'amidon ceux-ci sont impliqués dans le processus de ramollissement des bananes (Grierson *et al.,* 1981; Brady, 1987; Tucker *et al.*, 1987). L'amidon étant le polysaccharide le plus abondant dans la banane, son hydrolyse enzymatique conduit à une modification prononcée de la structure cellulaire. Cependant sous l'effet des polysaccharides comme les pectines, la cellulose et les hémicelluloses la paroi cellulaire subissent des modifications lors de la maturation. Au sein de la banane, la paroi cellulaire est totalement modifiée par des phénomènes de solubilisation, déestérification et dépolymérisation (Emaga *et al.,* 2007). Dans le processus de sénescence post-récolte, la dégradation de l'amidon en glucose (Zhang *et al*., 2005), est suivie de l'accumulation de la saveur (Alkarkhi *et al.*, 2011; Mohapatra *et al.,* 2011). La banane ainsi mûrit avec des modifications physicochimiques qui aboutissent au changement de couleur du vert au jaune jusqu'à l'apparition des taches noires (Lescot, 1999).

Dans la mûrisserie, tout le processus de maturation des bananes et plantains est influencé par la température, l'oxygène (O_2), le dioxyde de carbone (CO_2) et l'éthylène. Pour déclencher et homogénéiser le processus de maturation, les bananes sont traitées souvent à l'éthylène ou un mélange acétyl/éthylène (Bakry *et al.,* 1993). L'utilisation des concentrations de 200 et de 500 µM de mélatonine en traitement post-récolte des bananes, aurait des effets similaires à celui de l'éthylène. Elle retarde le brusque changement des indices de qualité organoleptique de la banane (Hu *et al.,* 2017). L'éthylène représente une phytohormone qui initie le processus de maturation des fruits de façon générale (Johnson *et al.,* 1997). Dans une expérience réalisée par Do Nascimento *et al.* (2006), il a été

démontré l'action accélératrice de l'éthylène dans le processus de maturation des bananes. Après l'exposition des fruits (bananes) à l'éthylène avec une température (T = 20 °C), elles ont atteint la phase climactérique en 2 jours. Cependant les bananes non traitées à l'éthylène avec la même température (T = 20 °C) retardaient de 12 jours pour voir leurs caractéristiques de production d'éthylène et d'augmentation des taux de CO_2. Cette élevation des taux de CO_2 est une action inhibitrice de l'action de l'éthylène, ce qui pourrait supprimer le pic climactérique selon Emaga *et al.* (2007).

Certains producteurs dans cette période post-récolte, immergent la banane dans des produits chimiques comme des solutions de bénomyl, de thiabendazole qui sont préjudiciables à la santé humaine et à l'environnement. Le traitement de la banane avec des acides organiques, des extraits de plantes ayant des propriétés anti-microbiennes serait une meilleure alternative (Sanchita et Hari, 2018).

En post-récolte, le traitement de la banane à base de la lumière LED est aussi pratiqué et pourrait induire sa maturation et améliorer sa qualité nutritionnelle. Il est bénécifique parce qu'il réduit le temps de maturation et constitue une alternative à l'utilisation des produits chimiques (Huang *et al.,* 2018).

Lorsque la banane jaunie, elle est en maturité et sa valeur marchande baisse au profit des consommateurs en 1 à 3 jours, elle se ramolie vite, des tâches de sénescence apparaissent enfin un développement des mauvaises odeurs (Emaga *et al.*, 2007).

La période postrécolte se caractérise par 7 phases ou stades d'évolution qui sont: le stade 1 (vert), le stade 2 (banane à la couleur vert clair), le stade 3 (tournant vert), le stade 4 (tournant jaune), le stade 5 (banane jaune aux extremités vertes), le stade 6 (banane jaune), le stade7 (banane jaune tachetée)(Chillet *et al*., 2007; Emaga *et al.*, 2007) (voir figure ci-dessous).

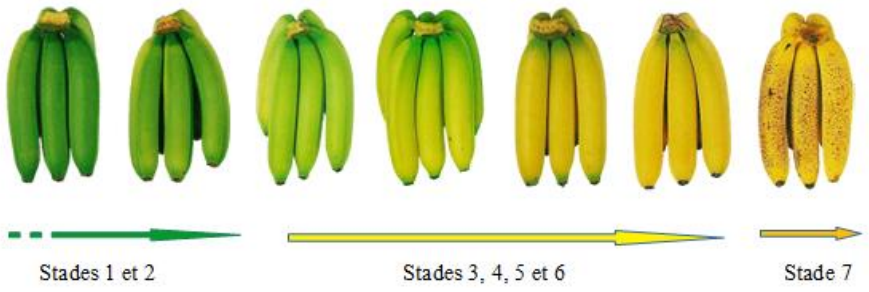


Figure 15: Stades d'évolution de la banane en période post récolte (Emaga *et al.*, 2007)

En fonction de l'indice de couleur de la peau, Aurore *et al.* (2009) ont indiqué que le processus de maturation de la banane peut être divisé en huit étapes différentes. Ils ajoutent la phase à laquelle la banane est considérée comme trop mûre et boueuse aux 7 étapes décrites par Emaga *et al.*, (2007).

5- Physico-chimie du bananier

a) Hampe

Une étude réalisée sur les éléments minéraux de plusieurs variétiés de bananier nain (Dwarf cavendish) et de bananier poyo (Robusta), a revelé que le bout de la hampe de ces 2 variétés présente une faible teneur en matière sèche. Un bananier nain a présenté 6,70g de matière sèche pour un poids frais de 610g et un bananier poyo a présenté 3,32g de matière sèche pour un poids frais égal à 367g, ce qui fait un rendement en matière sèche de 1% environ. Pour les mêmes variétés, les proportions d'azote et de potassium étaient respectivement de 1,5% et de 0,46% pour la variété naine et de 2,01% d'azote et 0,47% de phosphore pour la variété poyo. Précisons que toutes ces variétés d'origine Guinéenne avaient des hampes très fibreuses. Une étude similaire réalisée aux îles canaries indiquait des teneurs en matière sèche identiques à celles des variétés naine et poyo de Guinée, surtout pour les régimes récoltés en bordure de mer (Martin-Prével, 1962). Dans une autre étude, Oliveira *et al.,* (2006) ont trouvé que le taux de phosphore était de 20% des minéraux dans la hampe. Pour les composés lipidiques, la hampe est majoritairement composée d'acides gras saturés (AGS) avec une teneur de plus de 70% et l'acide palmitique représente son acide gras majoritaire.

b) Feuilles

Le silicium est le minéral majoritaire du limbe avec une teneur de 24%. Le limbe et le pétiole contiennent 9% de phosphore (Oliveira *et al.*, 2007).

Le glucide, le glucose, l'arabinose et le galactose sont les principaux constituants dans les pétioles des feuilles (Mohapatra *et al.,* 2011). Mais le glucose reste le glucide majoritaire des feuilles avec une teneur de 6%. Dans la gaine foliaire, la teneur de glucose est près de 28% et seulement 1% d'arabinose, de galactose et de mannose (Oliveira *et al.*, 2007). Quand aux lipides, les limbes représentent l'une des parties les plus riches en lipides (5,8%). L'acide gras le plus abondant dans les feuilles est l'acide palmitique comme dans la hampe (Oliveira *et al.,* 2006).

La teneur en protéine brute est de 8 à 9% dans le limbe identique à celle de la peau de banane, supérieure à celle de la pulpe de banane (1 à 4%) (Emaga *et al.*, 2007; Aurore *et al.*, 2009; Mohapatra *et al.*, 2011).

c) Fleur et bractées

Dans la structure du bananier, il existe divers composés phénoliques remplissant multiples fonctions. Au sein de la fleur, ces biomolécules existent et interviennent dans les mécanismes de défenses, dans la physiologie et dans la coloration des pièces florales. Les bractées externe et interne de la fleur contiennent des polyphénols totaux de 7,56 et 9,44 mg de phénols/g d'échantillon sec (Begum et Deka, 2019). Il faut préciser que le contenu en protéine de la fleur est assez faible (2%)(Sheng *et al.*, 2010) (Saravanan et Aradhya, 2011).Quand aux minéraux, les proportions sont bien importantes et peuvent atteindre 580 mg/100g (9, 17, 18). Sa teneur en lipide est la plus élevée (13%) en comparaison à celles de la peau (3 à 7%) et du limbe (5,8%). Contrairement aux autres parties du bananier, la fleur, la peau et la pulpe sont constituées d'acides gras polyinsaturés. L'acide linoléique est le plus abondant dans la fleur d'un bananier (Sheng *et al.*, 2010).

Son contenu en fibres alimentaires varie de 4 à 6 g/100g de fibres totales. Ses bractées internes et externes sont une grande source de fibres alimentaires (61,13% et 66,22%, respectivement) (Sheng *et al.*, 2010; Begum et Deka, 2019).

Dans une étude réalisée sur la fleur fraîche de la variété *Musa paradisiaca*, la teneur en glucide était 90,80 g/100g de fleurs (Bhaskar *et al.*, 2011).

6- Composition physico-chimique de la banane et du plantain

La composition de la banane varie suivant la variété, le stade de maturation et des facteurs de croissance comme la richesse du sol, le type de climat, les prétraitements, le stockage, etc (Schieber *et al.*, 2001).

La matière sèche des plantains varierait de 12,6% à 18,7%, qui peut atteindre 21,4% au stade 7 pendant la maturation et celle des bananes desserts serait de 7,7% à 12,9% (Emaga *et al.*, 2007). Il est établi que la matière sèche diminue pour la pulpe au fur et à mesure qu'elle mûrit (Trease et Evans, 1989), par contre la teneur en eau de la pulpe augmente pendant la maturation, provenant des glucides utilisés lors

de la respiration et du transfert osmotique entre la peau et la pulpe (Loeseck, 1950; Fernandes *et al.*, 1979).

La peau représente environ 40% du poids total d'une banane fraiche (Anhwange *et al.*, 2008). Dans le monde, la production annuelle de peau de banane est estimée à environ 36 millions de tonnes de peau. La majeure partie de ce sous-produit est mise au rebut ou dans une décharge ordinaire. Elle serait cependant plus riche en eau (89, 45%) que la pulpe. Elle contient de multiples composés comme les composés phénoliques, les vitamines, les sels minéraux, les fibres, les lipides et autres (Vu *et al.*, 2018).

a) Amidon et sucres solubles

Pendant la croissance et le développement des bananes, elles accumulent une grande quantité de carbone sous forme d'amidon qui peut varier de 12 à 35% de leur poids frais. Ces proportions varient en fonction des cultivars, des conditions du sol et du climat. Au fur et à mesure que la banane mûrit, son taux d'amidon pourrait baisser de 15 à 1% pendant le processus de maturation (Soares *et al.*, 2011). L'augmentation du poids d'amidon est simultanément suivie de l'augmentation de celui de sucres solubles qui peut atteindre 20%, le saccharose serait de 80% (Henderson *et al.*, 1959; Marriott *et al.*, 1981; Hill and ap Rees, 1993; Cordenunsi et Lajolo, 1995; Mota *et al.*, 1997; Shiga *et al.*, 2011).

En 2007, l'équipe d'Emaga a fait les mêmes observations pendant des études réalisées sur les variétés Big Ebanga et Grande Naine. La teneur d'amidon diminuait de 39,3% à 0,1%, du stade 1 au stade 7 de mûrissement pour la variété Big Ebanga, par contre sa composition en sucres solubles augmentait de 4,2 à 38,3%. Pour la variété Grande Naine, le taux d'amidon était de 11,1–3,3%, celui des sucres solubles augmentait de 2,2–32,4%. Globalement, ils ont constaté une diminution rapide de la réserve d'amidon dans la peau de banane chez les 2 variétés. Plusieurs études ont prouvé que cette disparition de la réserve d'amidon lors de la maturation des bananes semble être relativement rapide en raison des activités enzymatiques combinées de l'amylase, de la glycosidase, de la phosphorylase, dela saccharose synthase et de l'invertase (Cordenunsi et Lajolo, 1995).

Selon des analyses chromatographiques sur des peaux de bananes prises au stade de maturité commerciale, il existe 3 sucres solubles dans la banane dont les principaux sont le glucose et le fructose (Adisa et Okey, 1987).

Parmi les centaines de variétés de bananes dans le monde, la banane *Musa cavendish* reste la plus consommée et exportée. Elle possède 13,8 g de sucres / 100 g (1,9 g de glucose, 2,2 g de fructose, 9,7 g de saccharose) (Pereira et Maraschin, 2015).

Par ailleurs, il faut dire que dans la pulpe d'une banane à l'état vert, l'amidon est le composant le plus important (Emaga *et al.,* 2008). En 2009 et 2010, les résultats de différentes recherches de Gibert *et al.* ont confirmé celui d'Emaga *et al.,* (2008). Ces derniers travaux ont été réalisés sur la pulpe de plantain à l'état vert. L'amidon à lui seul représentait une teneur moyenne de 86,5% de la masse totale des sucres totaux dans la pulpe de plantain. Au sein de la banane dessert, la teneur en amidon varie en moyenne entre 70 % et 80 % dans la période préclimactérique qui correspond à la phase de non dépolymérisation de l'amidon à moins d'1 % à la fin de la période climactérique (Cordenunsi et Lajolo, 1995; Bertolini, 2009). Il faut préciser que la teneur en sucre augmenterait plus vite dans la pulpe que dans la peau (Adao et Glória, 2005).

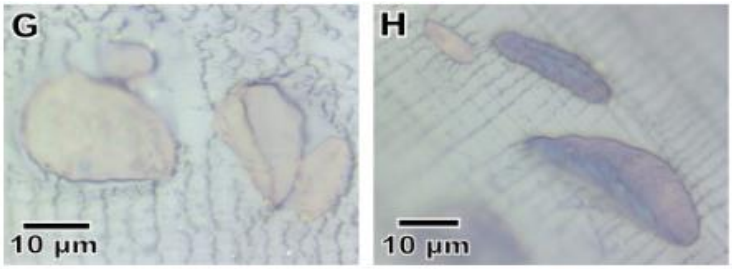


Figure 16: Granules d'amidon extraits de bananes vertes (à gauche) et de bananes mûres (à droite) (Fernanda et al., 2015)

- **Amidon résistant (AR)**

La banane verte est une bonne source d'amidon résistant pouvant être utilisé comme ingrédient fonctionnel pour le développement de produits alimentaires et dans le contrôle des maladies chroniques (Kumar *et al.*, 2018). C'est la fraction d'amidon qui ne peut pas être digérée dans l'intestion grêle. Elle parvient au tractus gastrointestinal intact. L'AR (Amidon résistant) n'est pas hydrolysé en D-glucose dans l'intestin grêle pendant les 120 minutes suivant sa consommation. Il est fermenté dans le côlon. Selon plusieurs études, l'AR est une molécule linéaire de α-1,4-D-glucane, essentiellement dérivée de l'amylose rétrogradée, ayant un poids moléculaire relativement faible (1,2×105 Da) (Tharanathan, 2002). L'amidon résistant possède une faible capacité de retention d'eau, ce qui fait de lui un ingrédient

fonctionnel, ainsi il permet une bonne manipulation et améliore les propriétés texturales du produit final (Baixauli *et al.*, 2008). Pour une meilleure santé, l'Organisation de la recherche scientifique et industrielle (CSIRO) recommande un apport total d'amidon résistant d'environ 20 g par jour. Cette recommandation est soutenue par Baghurst *et al.* (2001).

La proportion d'AR dans la peau serait beaucoup inférieure à celle contenue dans la pulpe de banane. Selon l'équipe de Garcia-Valle (2019), la teneur d'amidon résistant dans la farine de pulpe de plantain est environ 55%. Une étude de Cardenette en 2006 a montré que l'amidon dans la purée de la pulpe de banane verte était passé de 51% (avant la cuisson) à 10% (après la cuisson).

Au Brésil, plusieurs variétés de banane ont été évaluées sur le plan de leur contenu en amidon, en amylose et amylopectine par da Mota et ses collaborateurs en 2000. Les résultats des expérimentations se présentent comme suit:

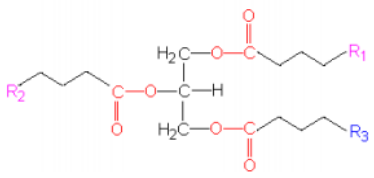
Tableau 1: Teneur en amidon, amylose et amylopectine dans la farine de huit variétés de bananes différentes (de Mota et al., 2000)

Variety	Starch content [%]	Amylose content [%]	Amylopectin content [%]
Prata comum	72.4 ± 3.6	20.3 ± 2.0	52.1
Ouro da mata	65.7 ± 2.8	21.9 ± 2.2	43.8
Nanica	76.5 ± 2.9	22.2 ± 1.3	54.3
Nanicão	76.1 ± 3.7	21.7 ± 2.6	54.4
Prata anã	68.2 ± 4.0	22.4 ± 1.5	45.8
Mysore	61.3 ± 6.9	18.8 ± 2.2	42.5
Ouro colatina	75.5 ± 2.0	23.0 ± 2.9	52.5
Maçã	64.9 ± 2.5	19.7 ± 2.5	45.2

b) Lipides

Les lipides constituent une famille hétérogène de molécules organiques insolubles dans l'eau et dans les solvants polaires et solubles dans les solvants non polaires tels que le chloroforme, l'hexane. Ils se subdivisent en 5 grandes classes:

- les lipides neutres dont les triglycérides constituent la classe la plus importante, constitués d'une molécule de glycérol estérifiée par trois acides gras;



R1, R2, R3= acides gras

Figure 17: Schéma représentant les triglycérides

- les lipides polaires: Majoritairement, ces lipides sont représentés par les phosphoglycérides et ils sont souvent appelés phospholipides ou triacylglycérols (TAG). Contrairement aux triglycérides, les phosphoglycérides qui possèdent un groupement acide phosphatidique sur le glycérol.

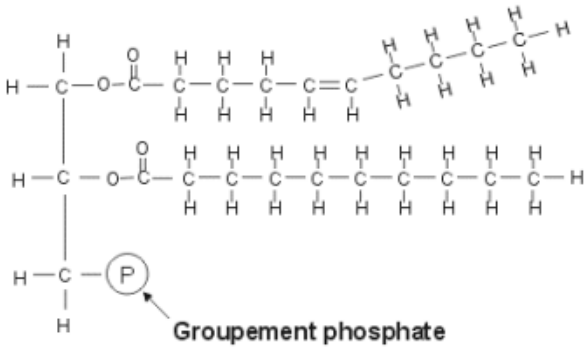
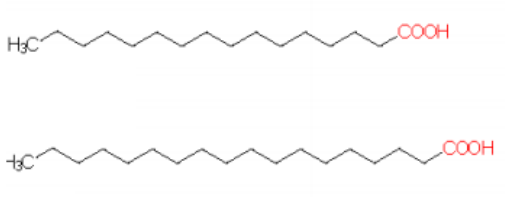


Figure 18: Schéma représentant les phospholipides

- les acides gras représentent les constituants élémentaires des lipides. Ces acides sont composés d'une chaîne hydrocarbonée comportant à une extrémité un groupement méthyle CH3 et à l'autre extrémité un groupement carboxyle COOH. Ils se reconnaissent par leur nombre de carbone, leur degré d'insaturation (il s'agit du nombre de doubles liaisons) et la position des doubles liaisons (voir figure ci-dessous) (Oliveira *et al.*, 2006).

Acides gras saturés



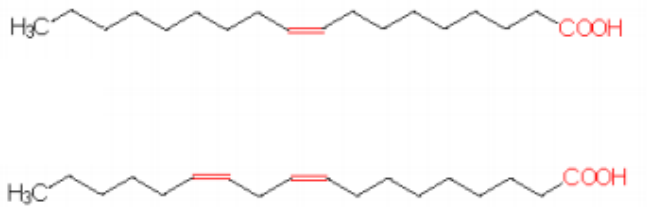
Acide palmitique

Acide stéarique

Figure 19: Schéma représentant des acides gras saturés (acide palmitique et acide stéarique) (Oliveira *et al.*, 2006)

Les acides gras saturés constituent 50% des acides gras de la pulpe de banane. Dans la peau, leur teneur varie de 11 à 40% (Oliveira *et al.*, 2006). Au sein du plantain, la teneur en acide palmitique atteint 37 à 42% des acides gras totaux et celle de la banane dessert *Musa cavendish* est de 27 à 42 %. C'est l'acide gras majoritaire du fruit (Sheng *et al.*, 2010).

Acides gras insaturés

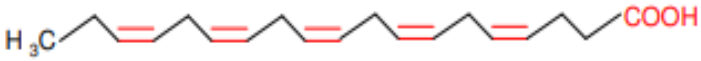


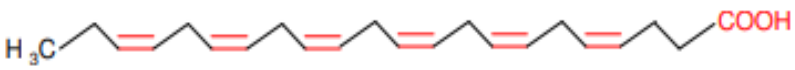
Acide oléique

Acide linoléique



Acides gras polyinsaturés n-3





Acide linolénique

Figure 20: Les acides gras (exemples d'acide gras saturés, insaturés et poly-insaturés) (Sheng *et al.*, 2010).

La banane dessert et le plantain ont des teneurs d'acide linoléique qui varient de 23 à 30 %. L'acide α-linolénique est un composant non négligeable des acides gras des bananes dessert et plantain, il représente 13 à 23% des acides gras dans la banane dessert et 20 à 29% dans la banane plantain. Dans les acides gras polyinsaturés, la présence de l'acide oléique (ω 9) dans les bananes est bien signalée (Emaga *et al.*, 2007; Oliveira *et al.*, 2008).

Le niveau de maturation agit faiblement sur les teneurs de lipide de la pulpe et de la peau (Haslinda *et al.*, 2009). D'après Emaga *et al.*, (2007), la teneur en lipide de la banane dessert et du plantain varie de 2,2 % à 10,9%.

Les substances liées de manière biosynthétique ou fonctionnelle à ces principales classes de lipides représentent la fraction insaponifiable de la banane. Ce sont principalement les sterols (voir figure suivante), des alcools tripterpéniques, des triterpènes et des tocophérols (Oliveira *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2007; Oliveira *et al.*, 2008).

Au sein de la banane, les esters de stéryle et les stérols libres sont identifiés comme les principaux composants lipophiles dans la peau de banane non mûre, tandis que les acides gras libres et les stérols dominent sa pulpe (Oliveira *et al.*, 2008). Selon des résultats des expérimentations sur des bananes vertes matures (Musa spp., du groupe AAA, sous-groupe Cavendish) du Honduras obtenus par Alsmairat *et al.*(2018), les profils d'ester pour la peau et la pulpe seraient similaires, ce qui correspond aux conclusions des études réalisées par Ji et Srzednicki (2015). Cependant Alsmairat *et al.* (2018) s'accordent que la pulpe contiendrait beaucoup plus d'esters et d'alcools que la peau de banane.



Noyau d'ester **Noyau du stérol libre**

Figure 21: Noyau d'ester et celui du stérol libre (Oliveira *et al.*, 2008)

Les principaux stérols au sein d'un bananier sont représentés ci-dessous et représentent 10 à 40% de la fraction insaponifiable du bananier:

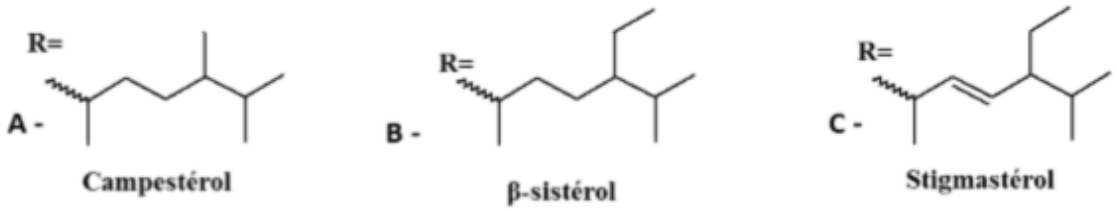


Figure 22: Principaux stérols d'un bananier (Oliveira *et al.*, 2008)

Dans le bananier, il existe 2 triterpènes: le 31-Norcyclolaudenone et le Cycloeucalenone. Leur proportion dans la fraction insaponifiable serait de 10 à 60% (31-Norcyclolaudenone) et (Cycloeucalenone) (Oliveira *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2008).

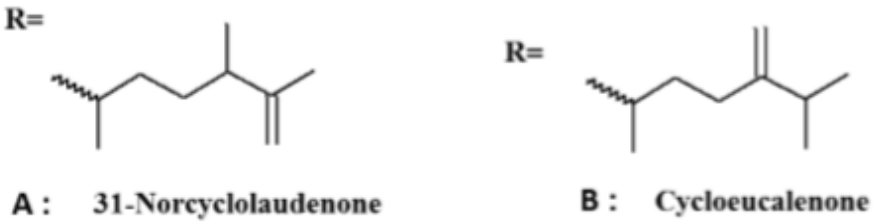


Figure 23: Principaux triterpènes présents dans le bananier (Oliveira *et al.*, 2008).

La peau de banane contient les principaux triterpènes et stérols suivannts: le stigmastérol, le β-sitostérol, le campestérol, le 24-méthylènecycloarterol, le cycloeucalénol et le cycloartenol (Knapp *et al.*, 1969).

- Les tocophérols regroupent les dérivés de vitamine E. Ils sont liposolubles comme les tocotriénols. Ils ont une action antioxydante permettant de protéger les cellules. Il existe 4 tocophérols qui se distinguent de par la position de leur groupe méthyle (α, β, γ, δ). Parmi ces tocophérols, l'α-tocophérol est la plus active biologiquement et l' γ-tocophérol est la plus abondante dans les aliments.

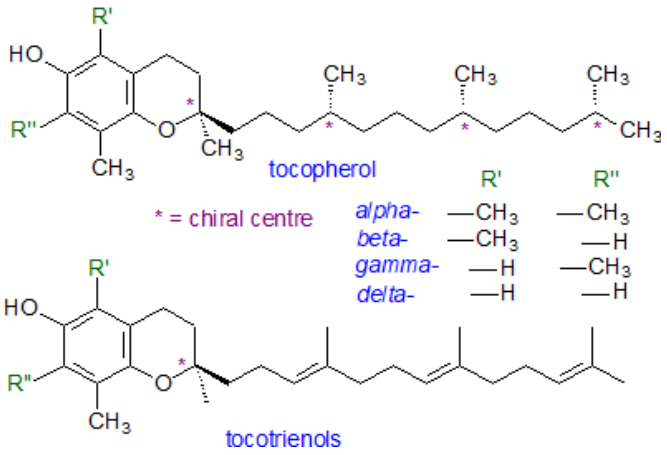


Figure 24: Squelette des tocophérols du bananier bien distinct de celle des tocotriénols (Knapp *et al.*, 1969).

La teneur de tocophérols est de 0,5 à 7mg/100 g dans le bananier avec une proportion élevée en α-tocophérols (Adao et Gloria, 2005; Bhaskar *et al.*, 2011). La peau renferme 72 mg/Kg MS et la pulpe en contient 2 à 10 mg/Kg MS (Vilela *et al.*, 2014).

c) Protéines et acides aminés

Dans la peau de banane, la proportion de protéines brutes serait de 8,1 % et 9,1 % du taux de matière sèche pour les plantains et entre 6,3 et 8,1 % pour la banane Cavendish. Dans la pulpe, elle serait aux environs de 1%. Il est important de souligner que ces teneurs de protéines des bananes varient en fonction des variétés et des zones agricoles (Emaga *et al.*, 2007; Aurore *et al.*, 2009).

Les cultivars Tanduk et Nangka de la Malaisie, présentent respectivement 2,301% à 0,844% en protéine dans leur farine. La valeur protéique du cultivar Tanduk est identique à celle rapportée pour la fécule de banane Macho (Bello-Pérez *et al.*, 1999). Les farines de plusieurs variétés colombiennes présentent une teneur protéique moyenne égale à 3,2% (Gibert *et al.*, 2009). En 2012, Pelissari *et al.* ont trouvé approximativement la même teneur de protéine dans la farine de banane, soit 3,16%.

La proportion des acides aminés essentiels de la peau de banane serait de 1,7% à 2,6% (soit une moyenne de 2,1%) tandis que celle des acides aminés non essentiels varierait de 2,6% à 5,5% (soit une moyenne de 4, 0%). Globalement, la part des acides aminés essentiels serait de 30% environ de la teneur totale des acides aminés contre 70% environ d'acides aminés non essentiels. Ces proportions en acides aminés indiquent que la banane contient beaucoup plus d'acides aminés non essentiels. Les

acides aminés essentiels les plus abondants dans la peau de banane sont la leucine, la valine, la phénylalanine et la thréonine. Cependant les acides aminés non essentiels sont l'alanine, l'acide aspartique et l'acide glutamique. Plusieurs publications reconnaissent que la teneur en acides aminés peut bien être influencée par le degré de maturité (Emaga *et al.,* 2007; Aurore *et al.,* 2009; Haslinda *et al.,* 2009).

Dans la pulpe, les teneurs de leucine, de valine et de cystéine augmentent avec la formation d'esters. Ce qui est contraire dans la peau de banane. Par ailleurs, il est reconnu que les voies métaboliques pour la formation de la valine et de la leucine sont respectivement celles de la synthèse des esters 2-méthylpropyle et de 3-méthylbutyle. Mais il existe des contradictions sur comment ces 2 acides peuvent s'accumuler malgré le fait qu'ils agissent comme des inhibiteurs de rétroaction de leurs voies synthétiques respectives. La présence de plusieurs autres acides aminés ont été indiquée dans la pulpe de banane pendant le mûrissement, ce sont notamment: l'alanine, l'arginine, l'asparagine, la glutamine et la méthionine (Alsmairat *et al.*, 2018). Les mêmes auteurs remarquent qu'il n'existe pas assez d'informations détaillées sur la concentration des acides aminés libres dans la peau et la pulpe des bananes pendant la maturation. Par contre, il existe des études décrivant la relation entre les mesures physiologiques de la maturité (par exemple les concentrations internes d'éthylène, d'O_2 et de CO_2, d'arôme et de couleur du pelage) et la teneur en acides aminés libres de la peau et de la pulpe.

D'après FAO (1991), la composition en acides aminés du plantain se présente comme suit

Tableau 2: Teneur en acides aminés (source: FAO 1991)

Acides aminés	Teneurs (mg N/g)
Lysine	93
Threonine	141
Tyrosine	89
Phénylalanine	134
Valine	167
Tryptophane	89
Isoleucine	116
Méthionine	48
Cystine	65
Total acides aminés soufrés	113
Total acides aminés essentiels	1042

d) Amines bioactives

Les amines bioactives sont des composés azotés basiques provenant des acides aminés avec la participation de microorganismes au sein des plantes ou dans les métabolismes des animaux. Elles interviennent dans le maintien des cellules, la viabilité et les processus cellulaires normaux comme neuromodulateurs et neurotransmetteurs. Elles sont représentées par la dopamine, la tyramine, la sérotonine, la noradrénaline, l'histamine, etc, tous connus sous le nom de **catécholamines** retrouvées dans les aliments (Płonka et Michalski, 2017). Les amines telles que la putrescine, la spermidine et la spermine sont impliquées dans plusieurs phénomènes physiologiques comme la croissance et la division cellulaires et affectent la sénescence des fruits telle que la banane (Borges *et al.,* 2019). L'histamine et la sérotonine sont des amines qui peuvent agir comme des substances protectrices, tandis que la dopamine et la noradrénaline sont liées à l'assombrissement enzymatique de certains fruits, comme les bananes (Marriott, 1980).

Parlant des polyamines, elles sont présentes dans toutes les structures des végétaux et des animaux. Leurs rôles sont multiples dans différents processus cellulaires comme l'apoptose, la division et la différenciation cellulaires, la synthèse de l'ADN et des protéines, l'expression des gènes, l'homéostasie et la transduction du signal (Cohen, 1998; Kaur-Sawhney *et al.*, 2003; Kusano *et al.*, 2008; Anwar *et al.,* 2015; Pegg, 2016). Ces biomolécules existent dans la banane et le plantain à différentes teneurs variant en fonction des génotypes et des niveaux de maturité (Handa *et al.*, 2018). C'est ce qui fait de la banane d'une source potentielle de composés nutraceutiques (Qamar et Shaikh, 2018). Les bananes et les plantains sont souvent consommés crus ou après la cuisson (par ébullition, micro-ondes et friture), ce qui pourrait agir sur les teneurs en éléments bioactifs (Borges *et al.,* 2019) (voir figure ci-après).

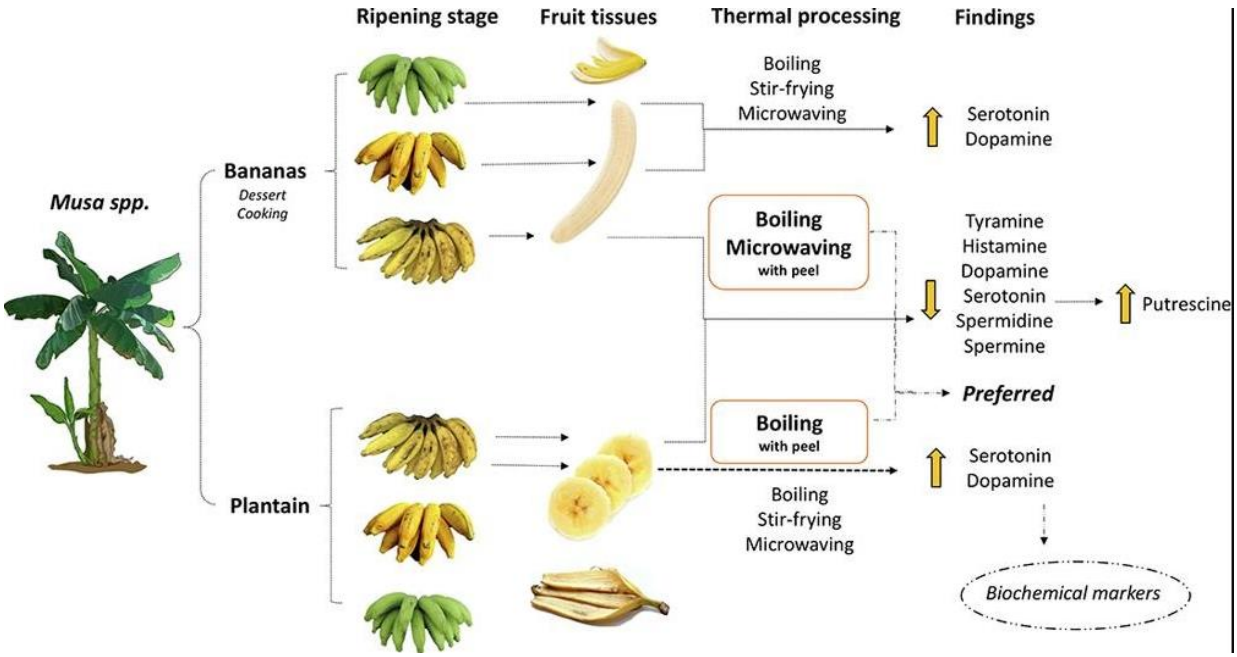


Figure 25: Evolution des teneurs d'amines bioactives sous l'effet de la maturation et de la température (Borges *et al.*, 2019).

Les pelures de bananes et plantains contiennent des teneurs plus élevées en composés bioactifs que les pulpes (Borges *et al.*, 2019)(illustré dans les tableaux 3 et 4 ci-dessous).

Tableau 3: Teneur en amines bioactives (mg / 100g ps) dans la peau de différents génotypes de Musa spp (Borges *et al.*, 2019).

Genotypes	Ripening stage	Putrescine	Spermidine	Spermine	Histamine	Tyramine	Dopamine	L-dopa	Serotonin
Dessert bananas									
Yangambi	2	$16.5 \pm 0.20^{eC*}$	19.5 ± 0.23^{eA}	25.9 ± 0.23^{cA}	59.0 ± 0.23^{gA}	33.1 ± 0.32^{hA}	179.2 ± 0.41^{gA}	5.9 ± 0.06^{dA}	18.6 ± 0.20^{eA}
	5	20.9 ± 0.22^{dB}	18.0 ± 0.42^{eB}	20.8 ± 0.32^{bB}	25.9 ± 0.32^{iB}	14.0 ± 0.05^{aB}	90.9 ± 0.62^{eB}	3.2 ± 0.03^{dB}	10.2 ± 0.19^{gB}
	7	25.0 ± 0.19^{cA}	15.0 ± 0.30^{eC}	15.1 ± 0.33^{bC}	18.6 ± 0.35^{hC}	9.5 ± 0.09^{dC}	32.7 ± 0.70^{gC}	1.0 ± 0.02^{fC}	8.2 ± 0.16^{iC}
Ouro da Mata	2	16.5 ± 0.26^{eB}	21.2 ± 0.22^{bA}	31.0 ± 0.36^{bA}	46.4 ± 0.41^{hC}	47.2 ± 0.10^{aA}	305.5 ± 0.80^{eA}	9.2 ± 0.01^{aA}	23.6 ± 0.20^{dC}
	5	17.0 ± 0.23^{fAB}	17.5 ± 0.16^{dB}	15.1 ± 0.18^{cB}	118.3 ± 0.32^{gA}	11.8 ± 0.09^{bB}	80.3 ± 0.69^{gB}	7.0 ± 0.06^{aB}	74.3 ± 0.56^{aA}
	7	17.8 ± 0.52^{fA}	16.9 ± 0.19^{bB}	14.1 ± 0.19^{cC}	109.9 ± 0.13^{gB}	11.1 ± 0.10^{aC}	74.6 ± 0.70^{fC}	4.2 ± 0.05^{cC}	72.6 ± 0.60^{fB}
Cooking bananas									
Pelipita	2	21.1 ± 0.42^{eC}	23.6 ± 0.22^{aA}	24.6 ± 0.22^{dA}	11.8 ± 0.32^{iB}	12.3 ± 0.12^{hA}	109.3 ± 0.95^{iC}	5.3 ± 0.06^{eC}	22.6 ± 0.23^{dC}
	5	23.6 ± 0.32^{eB}	20.3 ± 0.36^{aB}	22.8 ± 0.23^{aB}	54.9 ± 0.41^{hA}	9.2 ± 0.13^{fC}	202.1 ± 1.12^{aA}	5.9 ± 0.08^{cB}	48.6 ± 0.32^{eB}
	7	24.4 ± 0.36^{dA}	18.3 ± 0.41^{aC}	16.2 ± 0.12^{aC}	13.9 ± 0.35^{iB}	10.4 ± 0.16^{bB}	157.4 ± 1.13^{bB}	6.2 ± 0.08^{aA}	66.5 ± 0.40^{gA}
Plantains									
D'Angola	2	26.1 ± 0.35^{bC}	17.1 ± 0.29^{dB}	14.7 ± 0.11^{gA}	76.5 ± 0.19^{dC}	17.1 ± 0.16^{eA}	451.2 ± 0.32^{cA}	5.4 ± 0.10^{eA}	16.2 ± 0.39^{eC}
	5	27.6 ± 0.23^{bB}	18.2 ± 0.26^{eA}	14.4 ± 0.09^{eA}	189.3 ± 0.23^{eA}	9.9 ± 0.19^{dB}	137.7 ± 0.36^{cC}	1.0 ± 0.12^{fC}	39.7 ± 0.60^{fA}
	7	29.1 ± 0.36^{bA}	18.1 ± 0.18^{aA}	14.8 ± 0.05^{bA}	168.8 ± 0.38^{eB}	10.1 ± 0.06^{cB}	154.6 ± 0.41^{bB}	2.0 ± 0.13^{eB}	51.7 ± 0.50^{hB}
Curare E.	2	17.1 ± 0.40^{eC}	15.1 ± 0.19^{eA}	14.6 ± 0.13^{gA}	129.5 ± 0.30^{c}	17.5 ± 0.04^{dA}	642.7 ± 0.52^{aA}	5.8 ± 0.09^{dA}	18.1 ± 0.46^{eC}
	5	20.8 ± 0.32^{dB}	15.0 ± 0.22^{eA}	14.7 ± 0.16^{dA}	210.4 ± 0.35^{bC}	10.2 ± 0.02^{eB}	163.9 ± 0.13^{bB}	1.0 ± 0.01^{fC}	42.1 ± 0.70^{eB}
	7	23.8 ± 0.23^{dA}	14.5 ± 0.26^{eA}	13.9 ± 0.13^{cB}	257.8 ± 0.41^{aA}	10.1 ± 0.06^{eB}	164.0 ± 0.23^{aB}	1.2 ± 0.04^{fB}	94.4 ± 0.41^{dA}

Tableau 4: Teneur en amines bioactives (mg / 100g ps) dans la pulpe de différents génotypes de Musa spp (Borges *et al.*, 2019).

Genotypes	Ripening stage	Putrescine	Spermidine	Spermine	Histamine	Tyramine	Dopamine	L-dopa	Serotonin
Dessert bananas									
Yangambi Km5	2	15.3 ± 0.12^{dB*}	17.4 ± 0.52^{bA}	14.8 ± 0.10^{aA}	7.3 ± 0.08^{aA}	10.0 ± 0.02^{bA}	38.1 ± 0.69^{aA}	5.2 ± 0.02^{fB}	14.8 ± 0.75^{bA}
	5	26.0 ± 0.20^{cA}	16.1 ± 0.27^{cB}	13.9 ± 0.06^{bB}	6.9 ± 0.04^{eB}	9.3 ± 0.06^{aB}	31.3 ± 0.85^{bB}	5.4 ± 0.03^{cA}	8.6 ± 0.25^{dB}
	7	25.9 ± 0.23^{fA}	15.3 ± 0.10^{dC}	13.6 ± 0.03^{bB}	6.8 ± 0.03^{cB}	9.1 ± 0.02^{dC}	26.5 ± 0.12^{eC}	5.2 ± 0.01^{fB}	9.0 ± 0.08^{cB}
Khai	2	15.3 ± 0.20^{dB}	14.3 ± 0.10^{dB}	14.5 ± 0.03^{bA}	6.9 ± 0.25^{eB}	8.9 ± 0.01^{fB}	29.4 ± 0.36^{eB}	6.2 ± 0.02^{bA}	10.0 ± 1.15^{eA}
	5	24.7 ± 0.18^{cA}	17.2 ± 0.44^{aA}	14.0 ± 0.05^{bB}	7.5 ± 0.23^{bA}	9.4 ± 0.07^{aA}	30.7 ± 2.10^{bA}	5.4 ± 0.03^{bB}	10.6 ± 1.09^{cA}
	7	24.9 ± 0.20^{fA}	16.6 ± 0.51^{cA}	13.8 ± 0.27^{aB}	7.4 ± 0.08^{aA}	9.1 ± 0.11^{dB}	27.6 ± 0.23^{dC}	6.2 ± 0.01^{cA}	9.1 ± 0.28^{cB}
Pisang K. Bung	2	14.6 ± 0.22^{dC}	16.8 ± 0.40^{cA}	14.7 ± 0.08^{aA}	7.1 ± 0.05^{bA}	9.6 ± 0.34^{dA}	30.1 ± 0.34^{eA}	5.0 ± 0.02^{gA}	10.4 ± 0.34^{eA}
	5	20.1 ± 0.16^{dB}	17.2 ± 0.39^{aA}	13.8 ± 0.10^{cB}	6.9 ± 0.04^{eB}	9.3 ± 0.03^{aB}	29.6 ± 0.75^{cA}	5.0 ± 0.03^{dA}	7.7 ± 0.12^{dB}
	7	26.1 ± 0.18^{fA}	17.8 ± 0.10^{aA}	13.8 ± 0.05^{aB}	6.8 ± 0.03^{cB}	9.2 ± 0.09^{dB}	27.0 ± 0.20^{eB}	4.9 ± 0.02^{gA}	8.5 ± 0.08^{dB}
Ney Poovan	2	20.6 ± 0.22^{bB}	18.1 ± 1.04^{aA}	13.7 ± 0.10^{dA}	6.9 ± 0.08^{cA}	9.5 ± 0.01^{dA}	37.0 ± 1.23^{aA}	5.0 ± 0.10^{gC}	8.5 ± 0.33^{fA}
	5	20.8 ± 0.25^{dB}	16.9 ± 0.38^{aB}	13.6 ± 0.23^{cA}	7.0 ± 0.01^{dA}	9.4 ± 0.16^{aA}	30.1 ± 0.50^{eB}	5.5 ± 0.11^{bA}	9.4 ± 0.11^{dA}
	7	24.6 ± 0.26^{fA}	16.5 ± 0.20^{cB}	13.5 ± 0.03^{bA}	6.7 ± 0.01^{eB}	9.3 ± 0.06^{cB}	28.4 ± 1.16^{dC}	5.3 ± 0.12^{eB}	9.4 ± 0.65^{cB}
Ouro da Mata	2	14.3 ± 0.23^{dB}	16.3 ± 0.16^{cB}	14.8 ± 0.11^{aA}	7.4 ± 0.15^{aB}	10.3 ± 0.14^{aA}	35.4 ± 0.63^{aA}	5.1 ± 0.08^{fB}	20.3 ± 0.66^{aA}
	5	27.1 ± 0.16^{bA}	17.5 ± 0.23^{aA}	14.0 ± 0.04^{bB}	8.6 ± 0.24^{aA}	9.5 ± 0.10^{aB}	34.4 ± 0.24^{aA}	5.5 ± 0.06^{bA}	13.7 ± 2.91^{bB}
	7	25.7 ± 0.22^{fA}	17.1 ± 0.18^{bA}	13.9 ± 0.05^{aB}	7.1 ± 0.03^{bC}	9.2 ± 0.06^{dC}	27.7 ± 0.17^{dB}	5.0 ± 0.03^{gB}	9.0 ± 0.58^{eC}
Cooking bananas									
Monthan 301	2	14.9 ± 0.16^{dB}	17.5 ± 0.56^{bB}	14.2 ± 0.06^{cA}	7.3 ± 0.14^{aA}	9.5 ± 0.15^{dA}	27.9 ± 0.38^{fA}	5.0 ± 0.06^{gA}	7.9 ± 0.32^{fA}
	5	26.1 ± 0.23^{cA}	17.3 ± 0.24^{aA}	13.7 ± 0.09^{cB}	7.2 ± 0.08^{cAB}	9.4 ± 0.03^{aA}	28.3 ± 0.36^{dA}	5.0 ± 0.04^{dA}	7.7 ± 0.06^{dA}
	7	27.5 ± 0.25^{eA}	16.3 ± 0.26^{cB}	13.7 ± 0.04^{aB}	7.1 ± 0.04^{bB}	9.3 ± 0.02^{eB}	28.0 ± 0.03^{dA}	4.9 ± 0.03^{gA}	8.0 ± 0.06^{eA}
Monthan 172	2	16.0 ± 0.16^{dB}	17.3 ± 0.63^{bA}	13.8 ± 0.03^{dA}	7.0 ± 0.13^{cA}	9.1 ± 0.14^{eB}	26.8 ± 0.47^{fA}	5.0 ± 0.02^{gA}	8.8 ± 1.46^{fA}
	5	19.4 ± 0.18^{dA}	15.9 ± 0.10^{cB}	13.8 ± 0.02^{cA}	6.9 ± 0.04^{eA}	9.3 ± 0.09^{aA}	27.2 ± 0.25^{eA}	5.0 ± 0.01^{dA}	8.5 ± 0.19^{dA}
	7	18.9 ± 0.23^{hAB}	15.6 ± 0.62^{dB}	13.6 ± 0.09^{bA}	6.7 ± 0.05^{eB}	9.0 ± 0.07^{dB}	27.2 ± 0.11^{eA}	4.9 ± 0.05^{gA}	7.9 ± 0.05^{dA}
Simili Radjah	2	15.8 ± 0.25^{dC}	17.0 ± 0.31^{cA}	14.0 ± 0.04^{cA}	7.2 ± 0.08^{aA}	9.3 ± 0.18^{eA}	27.8 ± 0.29^{fA}	5.0 ± 0.03^{gA}	11.0 ± 0.95^{dA}
	5	25.4 ± 1.20^{cB}	16.0 ± 0.29^{cB}	13.7 ± 0.12^{cB}	6.9 ± 0.10^{eA}	9.2 ± 0.08^{bA}	28.0 ± 0.07^{dA}	5.1 ± 0.05^{dA}	8.0 ± 0.43^{dB}
	7	29.3 ± 0.73^{eA}	16.8 ± 0.10^{cA}	13.5 ± 0.18^{bB}	6.7 ± 0.11^{cB}	9.1 ± 0.15^{dA}	26.3 ± 0.44^{eB}	5.0 ± 0.03^{gA}	8.0 ± 0.18^{dB}

Dans les variétés d'*accuminata*, en particulier dans la peau, il a été identifié des catécholamines telles que la dopamine, la noradrénaline (Kanannzawa *et al.*, 2000; Adao *et al.*, 2005). La peau contenait plus de 1,5 g / 100 g au stade 3 contre 10 mg/100 g pour la pulpe au même stade, pour une variété de Cavendish nain des Philippines. Les teneurs diminuaient avec le mûrissement. Egalement, il y avait 30mg/100g de dopa au stade 3 dans la peau et 10 fois moins dans la pulpe. La norépinéphrine dans la peau était à 118mg/100g au stade 3 (Kanannzawa et Sakakibara, 2000)**.**

Depuis 1958, Waalkes a réalisé une étude sur des extraits de pulpe de bananes desserts et il a pu identifier des amines par chromatographie de façon plus précise, à l'aide de la ferricyanure comme du réactif. Ce qui lui a permis de différencier et de doser les amines bioactives suivantes dans la pulpe: la dopamine (65 mg /100g) et la norépinéphrine (0, 25 mg/100g) et la sérotonine (3,3 mg/100g) (Peumans *et al*., 2002).

e) Polyphénols et composés phénoliques

Le terme « phénol » renferme environ 10000 composés naturels identifiés par différentes techniques (Martin et Andriantsitohaina, 2002; Druzynka *et al.*, 2007). Sa structure se caractérise par la présence

d'au moins un noyau phénolique à 6 carbones (voir figure 14), auquel est directement lié au moins un groupe hydroxyle (OH) libre ou en liaison avec une autre fonction: éther, ester ou hétéroside (Balasundram *et al.,* 2006; Bruneton, 2008).

Les polyphenols encore dénommés composés phénoliques, sont des molécules spécifiques du règne végétal et ils existent dans toutes les parties des plantes (racines, tiges, feuilles, fleurs, fruits et graines). Ces molécules ne sont pas strictement indispensables à la vie du végétal, par contre elles interviennent dans les interactions de la plante avec son environnement (Richter, 1993; He *et al.,* 2008), aidant ainsi la plante à mieux vivre dans son écosytème (Martin et Andriantsitohaina, 2002; Manach *et al.* 2004; Druzynka *et al.,* 2007). Ces composés phénoliques interviennent également dans les mécanismes de défense et sont connus pour exercer de nombreux effets bénéfiques pour la santé. Nous pouvons citer la défense contre les radicaux libres (rôles d'antioxydant) et modulateur de l'expression enzymatique, en contribuant ainsi au soulagement d'un large éventail de maladies chroniques comme l'athérosclérose, les allergies, le cancer, le diabète, l'obésité, les lésions cutanées et les infections virales (Liu, 2004; Boots *et al.,* 2008; Huang et Shen; 2012). Des études ont indiqué l'utilisation bénéfique des polyphénols dans la conservation des aliments (protection des aliments contre les altérations liées aux activités microbiennes ou par des oxydations lipidiques) (Maqsood *et al.,* 2013). Des études mentionnent enfin des formulations de multiples additifs alimentaires, des compléments alimentaires et des médicaments à base de la banane (Claudine *et al.,* 2015)**.** Dans la banane, ces molécules bioactives sont plus abondantes dans la peau que dans la pulpe (Someya *et al.,* 2002).

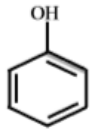


Figure 26: Structure du noyau phénol (Sarni-Manchad et Cheynier, 2006)

Les composés phénoliques des plantes proviennent de 2 voies métaboliques de cycles aromatiques:

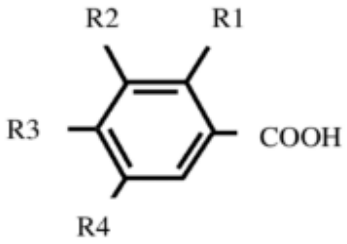
- la voie shikimate: responsable de la synthèse des acides aminés Phe et Tyr

- la voie polyacétate: consiste en la condensation de molécules d'acétylcoenzyme A. Cette voie de biosynthèse donne une diversité de molécules spécifiques des végétaux et organes végétaux (Guignard, 2000; Bruneton, 2008).

La classification des polyphénols tient compte de plusieurs paramètres dont les principaux sont: la base de la structure, le nombre de noyaux aromatiques et les éléments structuraux liant ces noyaux. Il existe les composés phénoliques simples et les composés phénoliques complexes (Scalbert & Williamson, 2000; D'Archivio *et al.*, 2007; Bruneton, 2008).

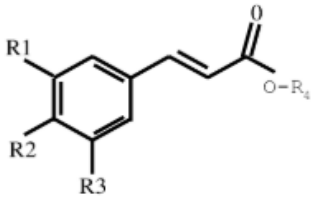
- **Composés phénoliques simples**

- **Acides phénoliques:** ils sont des composés organiques ayant une fonction carboxylique et un hydroxyle phénolique. Ces acides sont représentés par les dérivés de l'acide hydroxybenzoïque (C6-C1) et de l'acide hydroxycinnamique (C6-C3) (Bruneton, 2008).



R1 = R2 = R3 = R4 = H : acide benzoïque (non phénolique)
R1 = R2 = R4 = H, R3 = OH : acide *p*-hydroxybenzoïque
R1 = R4 = H, R2 = R3 = OH : acide protocatéchique
R1 = R4 = H, R2 = OCH_3, R3 = OH : acide vanillique
R1 = H, R2 = R3 = R4 = OH : acide gallique

Figure 27: Structures chimiques des acides hydroxybenzoïques (Bruneton, 2008).



R1 = R2 = R3 = R4 = H : acide cinnamique (non phénolique)
R1 = R3 = R4 = H, R2 = OH : acide *p*-coumarique
R1 = R2 = OH, R3 = R4 = H : acide caféique
R1 = OCH_3, R2 = OH, R3 = R4 = H : acide férulique
R1 = R3 = OCH_3, R2 = OH, R4 = H : acide sinapique
R1 = R2 = OH, R3 = H, R4 = acide quinique : acide chlorogénique

Figure 28: Structures chimiques des acides hydroxycinnamiques (Han *et al.*, 2007; Chira *et al.*, 2008).

Les acides phenoliques identifiés dans la banane sont l'acide caféique, l'acide chlorogénique et l'acide protocatéchique (Hardisson *et al.*, 2001; Someya *et al.*, 2002).

➢ Flavonoïdes

Ce sont des composés qui possèdent un squelette de base à quinze atomes de carbone, constitués de 2 noyaux aromatiques et d'un hétérocycle central de type pyrane, qui donnent une structure C6-C3-C6 (Ghedira, 2005). Ils sont les plus abondants parmi tous les composés phénoliques. Ils ont plusieurs rôles importants pour les végétaux, on peut citer la protection contre le rayonnement UV, la coloration des fleurs, les attaques microbiennes et contre les herbivores (Crozier, 2003).

Les principales classes des flavonoïdes sont les flavones, les flavonols, les flavan-3-ols, les isoflavones, les flavanones et les anthocyanidines. La structure de base des différents flavonoïdes pourrait subir de multiples substitutions, les groupements hydroxyles étant généralement en positions 4, 5 et 7. Ces molécules existent généralement sous forme de glycosides (Chira *et al.*, 2008).

Dans la banane, les flavanols seraient des flavonoïdes responsables de l'activité antioxydante. Ils contiennent des monomères (catéchines) et les tanins catéchiques. Les tanins catéchiques encore appelés tanins non hydrolysables ou tanins condensés ou proanthocyanidines sont des composés polyphénoliques ayant une forte affinité pour les proteines (Someya *et al.*, 2002; Haslinda *et al.*, 2009).

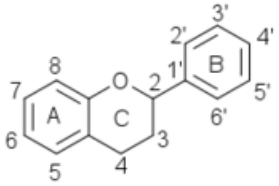


Figure 29: Squelette de base des flavonoïdes (Crozier, 2003).

➢ Flavonols

Les flavonols existent sous 2 formes: aglycones et hétérosides et leur particularité est marquée par la présence d'un groupement OH en position C3 et d'une double-liaison en C2-C3. Les aldoses D-glucose et Lrhamnose sont les principaux sucres (Crozier, 2003). Les flavonols les plus abondants sont la quercétine, le kaempférol et la rutine (Hertog *et al.*, 1993; Manach, 1998).

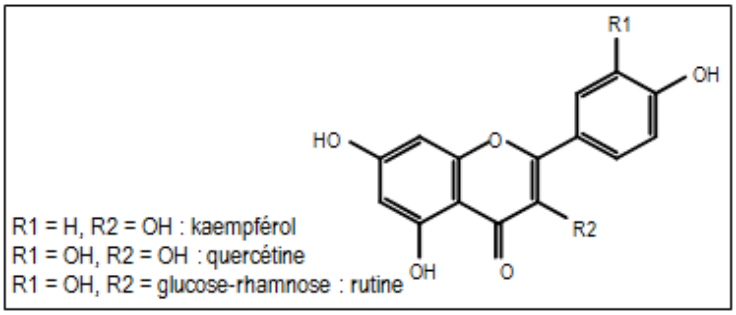


Figure 30: Structure chimique de flavonols (Crozier, 2003).

- **Flavan-3ols**

Les flavan-3-ols sont aussi appelés dérivés de catéchine. Ils sont les plus complexes. Ces composés vont des simples monomères, catéchine et son isomère épicatéchine, jusqu'aux oligomères et polymères, les proanthocyanidines. Les flavan-3ols pourraient bien être estérifiés par l'acide gallique ou hydroxylés pour former les gallocatéchines représentées par l'épicatéchine gallate, épigallocatéchine, épigallocatéchine gallate **(**Chira *et al.*, 2008**)**.

La gallocatéchine représente le flavan-3-ol le plus abondant de la peau de banane. Sa teneur est de 158 mg EC/100 g dans la peau contre 29,6 mg EC/100 g d'extrait sec dans la pulpe (Someya *et al.*, 2002). Par ailleurs, il a été constaté que la peau a une activité antioxydante supérieure à celle de la pulpe de banane. Cette étude a prouvé également que la teneur en gallocatechines contribue à l'augmentation de la capacité antioxydante des bananes. Dans cette experimentation de l'équipe de Someya, des extraits secs de peau et de pulpe de banane ont été utilisés à 1 mg/ml pour 0,5 mM d'acide gallique et de l'eau distillée (contrôle). Les temps d'incubation sont comparés à 0,3 d'absorbance 500 nm.

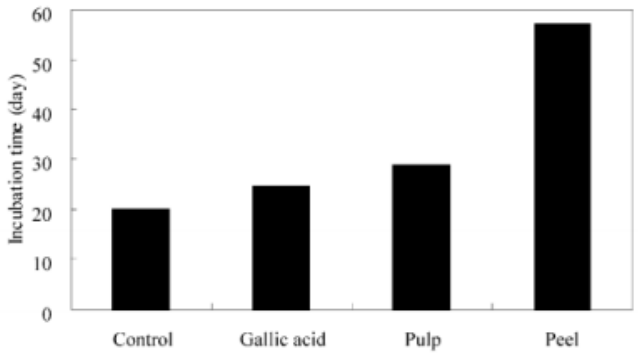


Figure 31: Effets des extraits de banane sur l'auto-oxydation lipidique (Someya *et al.*, 2002).

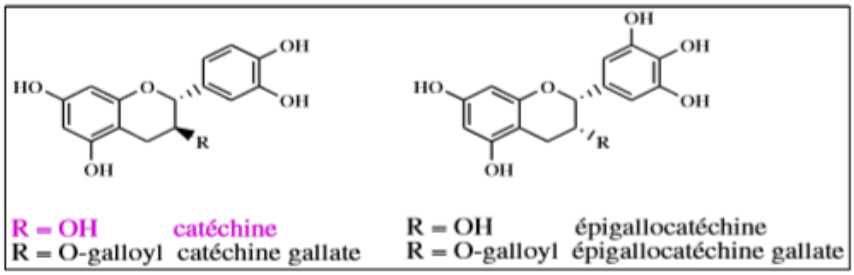


Figure 32: Structure chimique de quelques flavan-3-ols (Chira *et al.*, 2008).

- **Anthocyanidines**

Ce sont des pigments naturels qui se présentent sous forme de glycosides stables et hydrosolubles. Elles prennent les couleurs rouges en milieu acide, virent au bleu-violet en milieu neutre ou faiblement alcalin (Košir *et al.*, 2004). Les anthocyanidines les plus courants sont la pélargonidine, la cyanidine et la malvidine (Ribeiro *et al.*, 1999; Vitrac *et al.*, 2005).

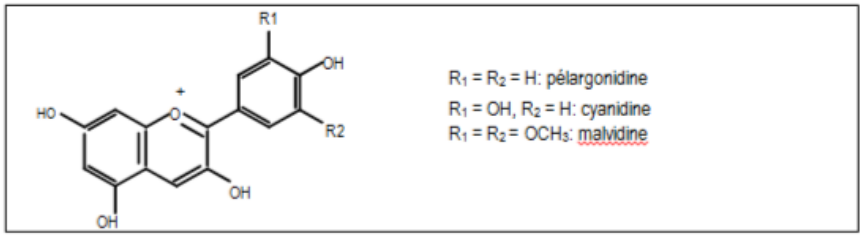


Figure 33: Structure chimique de quelques anthocyanidines courantes (Han *et al.*, 2007; Chira *et al.*, 2008).

- **Composés phénoliques complexes**

Ce sont les tanins. Les tanins sont localisés dans les vacuoles (Aguilera-Carbo *et al.*, 2008). Ils regroupent les composés polyphénoliques caractérisés par leurs propriétés de combinaison aux protéines (Bouhris *et al.*, 2017), ce qui leur confère leur capacité à tanner le cuir. Selon Linden et Lorient (1994), ils sont subdivisés en 2 groupes suivant leur structure (tanins hydrolysables et tanins condensés):

- Tanins hydrolysables: ce sont des esters du D-glucose et de l'acide gallique ou de ses derivés, notamment l'acide ellagique (Cowan, 1999; O'Connell et Fox, 2001). Par la voie chimique ou

enzymatique, ces tanins sont facilement hydrolysables, c'est les tannases (Ribéreau-Gayon, 1968).

- Tanins condensés: on les appelle aussi les proanthocyanidines, ce sont des polymères constitués d'unités de flavane reliées par des liaisons entre les carbones C4 et C8 ou C4 et C6 (Bruyne *et al.*, 1999; O'Connell et Fox, 2001).

En raison de leur complexation avec les protéines salivaires, les tanins sont à base de l'astringence, qui est une caractéristique des fruits avant maturité.

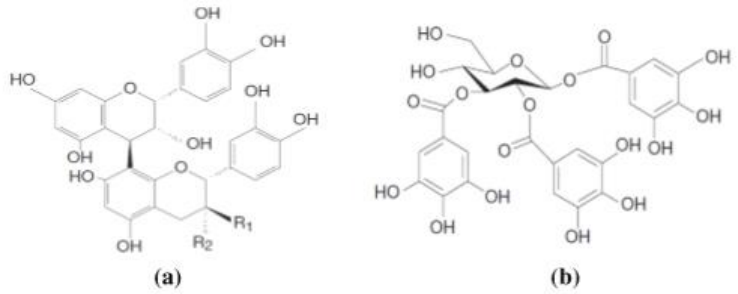


Figure 34: Structure chimique (a) d'un tanin condensé (proanthocyanidine) et (b) d'un gallotanin (1,2,3-tri-O-galloyl-β-D-glucose) (Derbel et Ghedira, 2005).

Selon le mode d'extraction, la nature du solvant et la variété, les teneurs en polyphénols totaux (PT) sont données en équivalent acide gallique (EAG). Mais dans certaines variétés de banane, cet acide phénolique est absent, c'est alors la catéchine qui sert d'équivalent (EC) (Someya *et al.*, 2002).

D'une manière générale, dans la peau de banane, la teneur des composés phénoliques varie de 0,90 à 3,0 g / 100 g de poids sec et celle de la pulpe est de 232 mg EC /100g (Someya *et al.*, 2002). Haslinda *et al.*(2009) ont dosé les teneurs phénoliques totales de la farine de banane avec et sans la peau et ont trouvé respectivement 1402 mg et 747 mg d'équivalent catéchol par échantillon de 100 g. Les activités antioxydantes respectives ont été de 81,20 % et de 65,58 %. Ce qui explique la corrélation entre l'augmentation des teneurs des composés phénoliques et l'activité antioxydante. Egalement les résultats de Haslinda *et al.*, (2009) confirment ceux de Someya et ses collaborateurs (2002), qui ont signalé que la gallocatéchine était plus abondante dans la pelure que dans la pulpe et qu'elle présentait une forte activité antioxydante dans les bananes *Musa cavendish,* comparé à l'échantillon de contrôle de gallocatéchine. Par ailleurs, il a été demontré que la teneur totale en phénols des farines de banane (pelées et non pelées) serait également plus élevée que celle de plusieurs fruits et légumes notamment l'oignon (56,8 mg de catéchol/100 g d'échantillon), la tomate (68 mg/100 g échantillon), le brocoli

(87,5 mg de catéchol/100 g échantillon) et la betterave (323 mg de catéchol/100 g), qui sont reconnus avoir des teneurs totales en phénols élevées (Kaur et Kapoor, 2002).

Tableau 5: Contenu phénolique total et activité antioxydante des échantillons de farine de banane (Haslinda *et al.*, 2009).

	Flour sample	
	Without peel	With peel
Total phenolic content (mg catechol/100 g flour)	746.67 ± 18.6^{A}	$1401.53V \pm 98.34^{B}$
Antioxidant activity (%)	65.58 ± 3.50^{A}	81.20 ± 5.80^{B}

Data presented as the mean ±1 standard deviation ($n = 3$). Means within a row with the same uppercase superscript letter are not significantly at the 5% probability level.

f. Minéraux

La banane dessert et le plantain sont une meilleure source dans l'alimentation pour l'apport de potassium (K) et de magnésium (Mg). De cette composition minérale, les bananes peuvent être utilisées pour le contrôle de la contraction musculaire. Les différents cultivars de banane peuvent fournir de multiples macro et micro minéraux dans le régime alimentaire tels que P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn, Cu et B (Wall, 2006). Dans la ration alimentaire d'un adulte, 7 % des besoins en K pourraient être couverts par 100 g de banane (Singh *et al.*, 2016). Selon Sulaiman *et al.* (2011), après des études réalisées sur plusieurs cultivars, la teneur en K de la peau de banane seraient de 1062,1 à 1387,5 mg/100g, nettement supérieure à celle de la pulpe qui varierait de 295,7 à 463,6 mg/ 100g de poids frais. Les études réalisées par Emaga *et al.* (2007), précisent que le taux de potassium augmente au cours de la maturation et peut être de 5,7% au stade1 et de 6, 3% au stade 7 pour la banane dessert et pour le plantain, il serait de 4,6 % stade1 à 5,5 % stade 7. Wall (2006) a indiqué que la concentration du potassium dans des échantillons de différents cultivars de la banane d'Hawaii varierait de 287,1 à 485,0 mg/100g de poids frais. Les teneurs moyennes en K et Mg de la même banane d'Hawaï seraient de 330,6 mg/ 100g et de 35,1 mg/100g, respectivement (Singh *et al.*, 2016). Cette différence de teneur serait certainement liée aux fertilisants utilisés pendant la culture et la reserve du sol en éléments minéraux.

Les analyses de cendres de pulpe et de peau ont souvent montré que la proportion de tous les constituants minéraux, notamment celle de la potasse est plus élevée dans la peau que dans la pulpe. Le

tableau ci-dessous présente la teneur relative des minéraux trouvés dans la farine de banane Awak. En général, les résultats montrent que la plus forte teneur en minéraux est celle du potassium (982 mg/100 g de matière sèche), suivi du magnésium, du calcium, du sodium et d'autres. Toutefois, il faut noter que par rapport à d'autres espèces et cultivars de bananiers, la teneur globale en minéraux de la farine de banane Awak serait relativement plus faible. La teneur totale en minéraux augmenterait avec l'ajout de la peau dans la farine de pulpe. Les proportions de sodium et de calcium pourraient augmenter de près de quatre fois et de deux fois lors de l'ajout de la peau, respectivement (Englberger *et al.*, 2003; Wall, 2006 ; Emaga *et al.*, 2007).

Tableau 6: Teneur en minéraux des échantillons de farine de banane (mg/100 g de matière sèche) (Haslinda *et al.*, 2009).

Mineral	Flour sample Without peel	With peel
Potassium	982.38 ± 9.51^{A}	1309.33 ± 3.71^{B}
Magnesium	105.37 ± 0.90^{A}	107.64 ± 0.36^{B}
Calcium	28.91 ± 0.10^{A}	57.35 ± 1.06^{B}
Sodium	6.73 ± 0.26^{A}	26.39 ± 0.53^{B}
Iron	1.73 ± 0.03^{A}	$1.75 + 0.02^{A}$
Zinc	0.74 ± 0.03^{A}	0.83 ± 0.04^{B}
Copper	0.19 ± 0.02^{A}	0.33 ± 0.02^{B}

g. Vitamines

La banane et le plantain apportent une contribution utile en vitamines A, C et B6 dans le régime alimentaire (Fungo et Pillay, 2011). Les bananes sont recommandées pour réduire la carence en vitamine A car elles renferment un ratio élevé de précurseurs de provitamines A (Fu *et al.*, 2019). La banane possède un contenu en vitamines modérément riche en pyridoxine (vitamine B6), par contre les vitamines A (carotène), B (niacine, thiamine, riboflavin et B6) et C (acide ascorbique) sont en concentrations relativement élevées dans la banane mature (Kanazawa et Sakakibara, 2000). La teneur en provitamine A (pVAC) des bananes douces et plantains, variait de 20,8 à 6341,5 µg / 100 g et la teneur la plus élevée serait enregistrée dans la pulpe du fruit mûr au stade5, diminuant pendant la maturation du fruit au stade7 (Borges *et al.*, 2019). Une autre étude a demontré que la proportion moyenne d'α-carotène dans le bananier est de 31% du total des caroténoïdes, le reste étant du β-carotène et de la lutéine (Fu *et al.*, 2019). L'accumulation de caroténoïdes dans la pulpe de banane mûre est similaire à celle de la carotte mutante d'*Arabidopsis thaliana* lut5 et de la carotte à racine orange (Kim et DellaPenna, 2006; Arango *et al.*, 2014).

Dans des extraits de banane douce, la teneur de vitamine C serait de 31 mg /100g et celles de la thiamine et de la niacine seraient respectivement de 40µg/100g et 600 mg /100 g. La riboflavine et la B6 sont respectivement estimées à 20 µg/100g et 470 mg /100g. Pour le plantain, la teneur serait de 20 mg /100g de vitamine C, 50µg/100g de thiamine, 700 mg / 100 g de niacine, riboflavine 50 µg/100g. Au cours de la réalisation de ces expérimentations, les teneurs ont été comparées au matériel frais et pour les bananes non mûres (Kanazawa et Sakakibara, 2000; Adao *et al.*, 2005). Elles diminuaient avec le mûrissement à l'image des amines biogènes retrouvées à différents stades de maturation (Kanazawa et Sakakibara, 2000).



Figure 35: Photographie montrant de la pulpe de banane à faible teneur (FHIA 25) et riche en vitamine A (Kokopo) (Fungo et Pillay, 2011).

h. Composés volatiles et aromatiques

Selon les résultats des travaux réalisés par Bugaud *et al.* (2009), les teneurs totales en composés volatils sont de 1,7 à 36,4 et 9,1 à 33,3mg/kg de poids frais dans les cultivars FLHORBAN 920 et Grande naine respectivement. Les principaux alcools constituants les composés volatils et aromatiques étaient (2-méthyl propanol, 2-pentanol, butanol, 3-méthyl butanol, 2-heptanol, hexanol, (e)-4-hexen-1-ol, 2,3-butanediol, (z)-3octen-1-ol, 2-[2-butoxy éthoxy] éthanol et 3,3-diméthyl-2-pentanol) et leurs teneurs variaient de 0,4 à 15,5 et de 0,5 à 11,7mg/kg de poids frais de FLHORBAN 920 et de Grande naine. Dans la même étude, divers esters (butanoate d'éthyle, acétate de butyle, acétate de 2-pentanol, 2-méthylpropyl-2-méthylpropanoate, acétate de 3-méthylbutyle, 2-méthylpropylbutanoate, butanoate de butyle, 3-méthylbutyl-2-méthylpropanoate, acétate d'hexyle, 3-méthylbutanoate de butyle, hexanoate de butyle, butanoate d'hexyle, octanoate d'éthyle, 3-hydroxyhexanoate d'éthyle, 3-hydroxybutanoate de butyle, hexanoate d'hexyle et octanoate d'hexyle) ont été retrouvés et avaient les teneurs variant de 0,1 à 10,5 mg/kg de poids frais dans FLHORBAN 920 et de 0,2 à 13,4mg/kg de poids frais dans la Grande naine. Par ailleurs, ils ont indiqué la présence des acides carboxyliques (acide acétique, acide 2-méthylpropanoïque, acide butanoïque, acide 3-méthylbutanoïque, acide hexanoïque, acide octanoïque

et acide décanoïque) qui avaient des teneurs variant de 0,8 à 3,4 et de 0,6 à 2,5mg/kg de poids frais dans FLHORBAN 920 et dans Grande naine respectivement. Quand aux carbonyles identifiés et dosés dans ces 2 cultivars de banane, on a: hexanal, 2-heptanone, (e)-2hexénal, 3-hydroxy 2-butanone, 2-nonanone et (e)-2-nonénal avec des teneurs respectives de 0,3 à 3,0 mg/kg de poids frais dans FLHORBAN 920 et de 0,8 à 4,5mg/kg de poids frais dans Grande naine. Dans les mêmes cultivars de banane, les divers éthers phénoliques ont été les suivants: eugénol, élémicine, 6méthoxyéthanol, limonène et p-cymène) avec 0,5-5,3 mg/kg de poids frais dans FLHORBAN 920 et 1,3-7,2mg/kg de poids frais dans Grande naine.

Au sein de la banane, la production d'esters de 2-méthylpropyle et de 3-méthylbutyle serait beaucoup plus élevée dans la pulpe que dans la peau, ce qui confirmerait que la pulpe produirait beaucoup plus d'arômes que la peau (Inaba *et al.*, 2007; Alsmairat *et al.*, 2018).

de Vasconcelos Facundo *et al.* (2012) ont démontré que l'entreposage à froid pourrait bien diminuer les teneurs des composés volatils de la banane. De nos jours, il est reconnu que tous les arômes et saveurs de la banane ne sont pas liés seulement qu'à ces molécules ci-dessus citées, certaines caractéristiques de saveur et d'arôme des bananes mûres sont attribuées à la présence de tyramine et d'histamine (Plonka et Michalski, 2017).

Tableau 7: Quelques composés volatils dans la pulpe de deux variétés de bananes, FLHORBAN 920 et Grande Naine, pendant le mûrissement (Bugaud *et al.*, 2009)

	Source of linear retention index		FLHORBAN 920					Grande Naine (Cavendish)				
				Days after ripening					Days after ripening			
Volatile compound	DB-Wax	Literature	Before ripening	4	6	8	10	Before ripening	4	6	8	10
TOTAL content (mg kg^{-1}FW)			1.7	5.3	9.1***	36.9	36.4	2.1	9.1	25.0***	37.1	33.3
Alcohols			0.4	0.3	1.5**	14.6	15.5*	0.5	0.9	6.9**	10.2	11.7*
2-Methyl propanol	1080	1099	ND	ND	0.20	5.78	5.19	ND	0.08	1.47	2.84	2.75
2-Pentanol	1107	1118	ND	0.01	0.13	0.35	0.48	ND	ND	0.56	1.65	2.07
Butanol	1138	1126	ND	0.01	0.13	1.27	1.18	ND	0.05	0.58	0.78	0.74
3-Methyl butanol	1210	1184	ND	0.04	0.34	5.06	5.28	ND	0.21	2.83	3.55	4.16
2-Heptanol	1327	1273	ND	ND	ND	0.06	0.06	ND	ND	0.06	0.13	0.17
Hexanol	1359	1331	0.05	0.06	0.23	0.73	1.50	0.06	tr	0.19	0.23	0.20
(*E*)-4-Hexen-1-ol	1423	1389	ND	ND	ND	ND	0.03	0.04	ND	0.06	0.20	0.17
2.3-Butanediol	1564	1583	ND	ND	ND	0.41	0.56	ND	ND	0.15	0.25	0.44
(*Z*)-3-Octen-1-ol	1600	–	ND	tr	0.04	0.08	0.08	ND	ND	0.04	0.01	0.02
2-[2-Butoxy ethoxy] ethanol	1796	–	0.35	0.17	0.39	0.57	0.76	0.37	0.53	0.77	0.39	0.78
3,3-Dimethyl-2-pentanol	1762	–	ND	ND	0.04	0.29	0.36	ND	0.02	0.15	0.17	0.21
Esters			0.1	0.9	3.3	10.5	10.3	0.2	1.5	8.0	13.4	9.1
Ethyl butanoate	1030	1028	ND	0.14	ND	0.25	0.61	ND	ND	ND	ND	ND
Butyl acetate	1061	1064	ND	ND	0.15	0.49	0.42	ND	ND	0.38	0.61	0.49
2-Pentanol acetate	1062	1161	ND	ND	0.06	0.23	0.09	ND	0.12	0.74	2.08	1.46
2-Methylpropyl 2-methylpropanoate	1083	1084	ND	ND	0.03	0.08	0.14	ND	ND	ND	ND	ND
3-Methylbutyl acetate	1116	1108	ND	0.12	0.27	3.50	2.06	ND	0.34	2.76	5.59	3.42
2-Methylpropyl butanoate	1161	1144	tr	0.02	0.11	0.98	0.84	ND	0.06	0.51	0.42	0.55
Butyl butanoate	1224	1197	ND	0.07	0.23	0.44	0.40	0.01	0.09	0.31	0.29	0.09
3-Methylbutyl 2-methylpropanoate	1274	1244	ND	ND	0.82	3.09	2.82	ND	0.46	2.49	3.18	1.78
Hexyl acetate	1276	1270	ND	0.02	ND	0.15	ND	ND	0.03	0.03	0.03	ND
3-Methylbutyl 3-methylbutanoate	1304	1287	tr	0.03	0.07	0.49	0.73	ND	0.04	0.59	0.93	1.15
Butyl hexanoate	1409	1350	0.03	0.09	0.17	0.22	0.26	0.03	0.04	0.02	0.03	ND
Hexyl butanoate	1433	1398	ND	ND	0.10	0.10	0.17	ND	ND	ND	ND	ND
Ethyl octanoate	1442	1423	0.05	0.19	0.68	0.05	0.09	0.10	0.18	0.07	0.13	0.05
Ethyl 3-hydroxy hexanoate	1685	1677	ND	ND	ND	0.26	1.16	ND	ND	0.05	ND	0.06
Butyl 3-hydroxy butanoate	1686	1524	ND	ND	ND	0.05	0.41	ND	ND	0.01	0.01	0.01
Hexyl hexanoate	1821	1738	0.02	0.12	0.30	0.02	0.09	0.01	0.10	0.06	ND	ND
Hexyl octanoate	1830	1806	0.02	0.11	0.27	0.03	ND	ND	ND	ND	ND	ND

i. Fibres alimentaires

La banane verte est bien reconnue pour sa teneur non négligeable en fibres alimentaires dont une partie peut rester non digérée ou absorbée dans l'intestin. Ces fibres avec l'amidon resistant peuvent stimuler la production d'acides gras à courte chaine qui seraient efficaces contre la constipation (da Mota *et al.*, 2000; Cassettari *et al.*, 2019).

Les fibres alimentaires sont principalement composées de fractions de fibres solubles (pectine, gommes, etc.) et insolubles (cellulose, lignine, hémicellulose, etc.) (Thebaudin *et al.* 1997). Les fibres

solubles interviennent pour abaisser le cholestérol sérique et pour aider à réduire le risque de cancer du côlon, tandis que la consommation de fibres insolubles serait bénéfique pour la régulation intestinale et le volume des selles (Schneeman, 1987). D'après Emaga *et al.* (2007), les pelures de bananes desserts et des plantains seraient plus riches en fibres alimentaires totales (TDF), soit 32.9 à 51.9%.

La valeur moyenne de fibres alimentaires insolubles (IDF) dans la farine de banane mûre serait plus élevée que dans celle de la banane verte (voir tableau ci-dessous). Les valeurs en fibres alimentaires solubles (SDF) obtenues dans différents échantillons de farine de banane dans la même étude, varierait de 3, 33 à 3,75% (Ramli *et al.*, 2009). Il est à préciser que les résultats de Ramli *et al.* (2009) sont en phase avec ceux trouvés par Emaga *et al.* (2007), qui ont signalé que les fibres alimentaires insolubles étaient la fraction dominante de fibres retrouvées dans la peau de banane dans toutes les variétés de bananes étudiées. Par ailleurs, ils affirment que la banane dessert serait plus riche en TDF que le plantain. Cependant, ils confirment que la teneur en fibres alimentaires solubles (SDF) pour la banane dessert pourrait atteindre 13% et 5-7% pour le plantain. Ces proportions sont supérieures à celles trouvées par Ramli *et al*. (2009).

Tableau 8: Composition en fibres alimentaires de la farine de différentes variétés de banane à différents stades de maturité (Ramli *et al.*, 2009).

	Types of flour			
Parameter	Cavendish Green	Cavendish Ripe	Dream Green	Dream Ripe
IDF	11.91 ± 0.001	25.25 ± 0.0002	10.91 ± 0.001	14.27 ± 0.34
SDF	3.58 ± 0.0002	3.75 ± 0.0004	3.33 ± 0.0004	3.47 ± 0.34

La proportion de TDF pourrait varier en mélangeant la farine de pulpe de banane et celle de la peau (Haslinda *et al.*,, 2009) (voir tableau ci-dessous).

Tableau 9 : Total de fibre alimentaire (TDF) des échantillons de farine de banane (g/100 g de matière sèche) (Ramli *et al.*, 2009).

	Flour sample	
Component	Without peel	With peel
Total dietary fibre	7.53 ± 0.08^{A}	11.27 ± 0.20^{B}
Insoluble dietary fibre	6.56 ± 0.15^{A}	9.46 ± 0.13^{B}
Soluble dietary fibre	0.97 ± 0.09^{A}	1.81 ± 0.07^{B}

Globalement, les pectines et les mucilages sont les fibres solubles dans l'eau au sein de la banane et du planatain. La cellulose, les hémicelluloses et la lignine sont leurs fibres insolubles dans l'eau (Bhaskar *et al.,* 2011).

La baisse du taux de fibre dans les matrices de banane serait engendrée par la dégradation de la cellulose et de l'hémicellulose sous l'action des cellulases et des hémicellulases (Prasanna *et al.*, 2007; Emaga *et al.*, 2008).

7- Usages ethnobotaniques

La banane est un fruit frais très apprécié dans le monde entier et son nom vient du mot arabe "banan", qui signifie doigt.

Comme indiqué précédemment, le potassium est le minéral majoritaire des bananes, à consommer en cas de prise d'un diurétique utilisé pour compenser l'épuisement du potassium en médecine. Sa teneur très élevée en potassium et faible en sodium réduit le risque d'hypertension et d'accident vasculaire cérébral (Kumar *et al.*, 2012). Grâce à son potentiel en potassium, qui aide à maintenir l'équilibre des fluides corporels, la banane serait un aliment idéal pour les jeunes enfants invalides et les personnes vivant avec le VIH/SIDA (Aurore *et al.*, 2009). La composition de la banane en fibres aiderait à lutter contre la constipation, les troubles digestifs, les colites ou les hémorroïdes, améliore le transit intestinal. La banane permet de lutter contre les troubles intestinaux, l'arthrite, la goutte, l'anémie, les allergies, les calculs rénaux, la tuberculose et les troubles urinaires (Chabi *et al*., 2018).

La banane est utilisée dans de nombreux pays comme un laxatif doux, pour lutter contre la constipation chez les enfants, la diarrhée et la dysenterie. La peau et la pulpe de la banane sont utilisées comme antibiotique, antifongique et possèdent des neurotransmetteurs. L'intérieur de la peau de la banane est utilisé pour lutter contre les verrues, les éruptions cutanées et les ecchymoses. La pelure de banane a été traditionnellement utilisée pour traiter l'anémie, les brûlures, le diabète, l'inflammation, la toux, les morsures de serpent, les ulcères malins, les piqûres d'insectes et les règles excessives (Ehiowemwenguan *et al*., 2014; Claudine et *al.,* 2015). La peau de banane serait localement utilisée pour favoriser la cicatrisation. Elle peut aussi prévenir un nombre important de maladies, telles que la dépression. Cependant, il faut préciser que cette peau qui représente un tiers du poids du fruit, est d'ordinaire mise au rebut (Hang *et al.,* 2018). La pulpe de plantain mûre a des propriétés hydratantes et anti-rides. Elle est utilisée dans un masque de beauté associée au lait de coco ou au miel (Kumar et *al.*,

2012). Dans la médecine traditionnelle chinoise, la thérapie alimentaire reconnait la banane comme antihypertenseur (Pereira et Maraschin, 2015; Zou, 2016). Quand à la farine de banane, sa consommation possède de multiples effets bénéfiques pour l'organisme: une perte de poids, un contrôle glycémique, une perte d'appétit, une amélioration de la fonction intestinale et du profil lipidique, le cancer, les maladies cardiaques et un retard du vieillissement, divers autres avantages pour la santé sont reconnues (Tavares da Silva S., 2014).

8- Usages industriels

La banane est l'un des aliments à bas prix et sert de nutriments à 4 à 5 milliards de personnes residant dans les pays en développement. Elle a une courte durée de conservation et peut se détériorer juste après la cueillette. Son transport vers les marchés constitue un sérieux problème sur sa qualité organoleptique et nutrionnelle. Afin de surmonter ces problèmes, la transformation industrielle de la banane est bien encouragée. Ce qui conduirait à l'accroissement du nombre d'agroindustries utilisant la banane comme matière première. Ainsi, cela augmenterait les superficies cultivables et favoriser la diversification des formes de consommation de la banane. Pour cela, la caractérisation des bananes, de leurs produits transformés, des formes de consommation et de conservation serait nécessaire pour améliorer sa transformation industrielle. Cela améliorerait l'éfficacité du marché de la banane et les revenus des agriculteurs, créer des emplois, etc (Singh *et al.*, 2018).

La banane est utilisée actuellement pour diverses applications industrielles, notamment comme biocarburants, biosorbants, pâtes et papier et cosmétique. Selon Itelima *et al.*, (2013), les pelures de banane auraient un rendement en éthanol plus élevé que celle du plantain. Les pelures de banane pourraient également être transformées et utilisées comme engrais organique, dans le nettoyage environnemental et procédés liés à la biotechnologie (Morton, 1987; Gunaseelan, 2004; Bori *et al.*, 2007). La pelure de banane pourrait bien être utiles dans la purification des eaux usées à travers ses effets bactéricides et fongicides (Singh *et al.*, 2018).

9- Usages alimentaires

La banane est un fruit prêt à consommer et l'un des plus abordables pour la consommation humaine, contribuant à la santé, en raison de son immense valeur nutritionnelle et médicinale. Les avantages de

la pulpe de banane pour la santé des consommateurs sont principalement dus aux acides phénoliques et aux flavanoïdes (Borges *et al.*, 2014). Mattila *et al.* (2006) ont soutenu que l'acide gallique, la catéchine, l'épicatéchine, les tanins et les anthocyanines sont les principaux composés phénoliques et que la teneur totale en acides phénoliques des bananes serait de 7 mg/100 g en poids frais. Ces composés bioactifs confèrent un goût astringent à la banane non mûre, aimé par des consommateurs. Elle est parmi les principales cultures fruitières du monde. Elle sert de nourriture idéale parmi les aliments à bas prix et sert de nutriments à 4 à 5 milliards d'habitants résidant dans les pays en développement (Singh *et al.*, 2018). Les diverses variétés de banane contiennent de la sérotonine, une hormone qui améliore l'humeur du consommateur (Kumar *et al.*, 2012). Elle est riche en hydrates de carbone et en potassium. A cause de son potentiel énergétique, elle est le premier choix des athlètes (Stover et Simmonds, 1987; Robinson, 1996 ; Lethmann *et al.*, 2002). Les fruits mûrs peuvent être séchés et consommés, ou coupés en tranches, mis en conserve avec du sirop, et utilisés dans les produits de boulangerie, les salades de fruits et les garnitures (Aurore *et al.* 2009).

La banane est consommée après avoir été pelée et constitue une bonne source de vitamine B6 et de fibres. Les bananes mûres sont principalement consommées crues, tandis que les fruits non mûrs de banane et les plantains peuvent être coupées en tranches, cuits comme légumes, frites, collations, poudre, sous forme de chips, etc (Singh *et al.*, 2018). Les fruits mûrs de la banane peuvent être réduits en pulpe pour préparer des purées qui sont ensuite utilisées dans une variété de produits, notamment la crème glacée, le yaourt, le gâteau, le pain, le nectar et les aliments pour les bébés. En Afrique, les nourrissons consomment la banane pour leurs sevrages (Emaga *et al.*, 2008). Les fruits verts entiers, sechés et moulus peuvent donner une bonne farine. Le vinaigre et les boissons alcoolisées peuvent être fabriqués à partir de bananes mûres et fermentées. Les bananes réformées sont utilisées pour nourrir les bovins et les porcs. Les bananes sont une bonne source d'énergie mais doivent être complétées par des protéines (Emaga *et al.*, 2008, Singh *et al.*, 2018).

Chapitre 2: Propriétés biologiques de la banane

La banane est d'un grand apport en nutriments. Elle a un potentiel en composés phénoliques, en minéraux, en vitamines et assure une bonne production de sérotonine. Sa composition en polyphénols et en catécholamines est bien appréciée. En raison de ces molécules, les scientifiques attribuent à la banane d'innombrables propriétés bénéfiques contre des grandes pathologies actuelles. Ces molécules bioactives seraient à la base de ses propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires, ses effets sur la contraction musculaire, etc. C'est l'un des aliments les plus nourrissants au monde et l'un des fruits le mieux adapté à la croissance de l'organisme humain (Muhapatra *et al.,* 2005; Emaga *et al.,* 2008; Borges *et al.,* 2014).

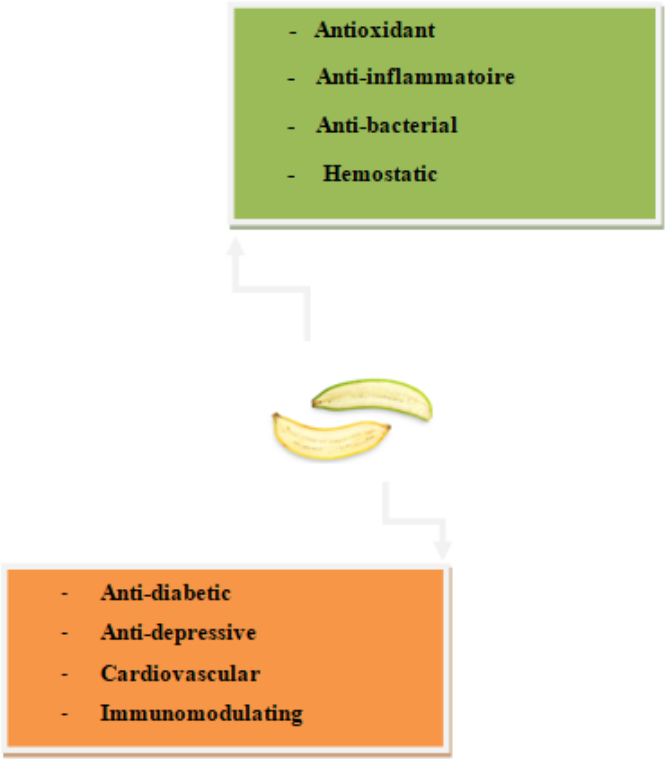


Figure 36: Les activités biologiques connues de la banane

1. Propriétés anti-oxydantes

Les réactions radicalaires ou anti-oxydantes se retrouvent régulièrement chez les êtres vivants, et sont impliquées dans la reproduction, la modification des gènes et la défense contre les maladies.

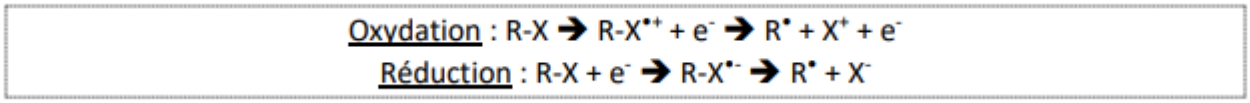
1.1 Radicaux libres

Par definition, un radical libre représente un atome ou une molécule qui porte sur sa couche électronique périphérique un ou plusieurs électrons non appariés, c'est-à-dire non couplés à un électron de spin opposé. Cela conduirait à une réactivité chimique très élevée avec des éléments voisins (Rochette, 2008; Leverve, 2009). Les espèces radicalaires étant électrophiles, pourraient retirer un électron à une molécule voisine afin d'apparier leur électron célibataire même si cet état est transitoire de l'ordre de la microseconde (Gambini et Granier, 2013). Cette phase transitoire serait liée au fait que le radical pourrait soit accepté un autre électron, soit transféré le ou les électrons libres chez une autre molécule comme l'acide nucléique, la protéine, le lipide pour rapparier son ou ses électrons célibataires. Ce qui aboutit à un état plus stable (Fontaine *et al.,* 2002). C'est juste une phase intermédiaire entrainant une réaction en chaîne qui va produire de nouveaux radicaux libres car la molécule agressée par le radical libre devient à son tour radicalaire. Les radicaux libres sont bien indispensables à la vie car ils participent à de nombreuses fonctions physiologiques lors de la croissance ou de la défense de l'organisme. Ils agissent pour le bon fonctionnement de certaines enzymes, à la transduction de signaux cellulaires, à la défense immunitaire contre les agents pathogènes, à l'apoptose des cellules tumorales, au cycle cellulaire. Ensuite, ils sont impliqués dans le fonctionnement de certains neurones et notamment celles de la mémoire, dans la fécondation de l'ovule, dans la régulation des gènes (Favier, 2003).

1.2 Formation des radicaux libres

D'après Gardes-Albert *et al*., (2003), les radicaux libres peuvent se former comme suit:

Par réaction d'oxydoréduction: les radicaux libres les plus connus ont un seul électron célibataire. Ils pourraient être formés à partir d'une espèce radicalaire qui subit une réaction d'oxydoréduction. Il y a soit gain ou perte d'électron suivant les reactions ci-dessous:



Le signe « • » représente l'électron célibataire.

Un des exemples les plus connus et illustratifs est la réaction de Fenton qui fait réagir le fer ferreux et le peroxyde d'hydrogène:

$$H_2O_2 + Fe^{2+} \rightarrow HO^{\bullet} + OH^{-} + Fe^{3+}$$

Par rupture homolytique: la production de radicaux libres peut se faire aussi par rupture homolytique d'une liaison covalente, ce qui conduit à la formation de 2 entités ayant chacune un électron célibataire.

$$R\text{-}X \rightarrow R\bullet + X\bullet$$

La rupture homolytique est le partage symétrique du doublet de valence commun, contrairement à la rupture hétérolytique qui fournit des ions de charges opposées. Celle-ci interviendrait en phase gazeuse ou en phase liquide pour les molécules ayant des liaisons peu polarisées. La molécule de dioxygène est représentative de ce type de rupture (voir son cas particulier ci-dessous). L'énergie de liaison qui relie les deux atomes d'oxygène (150 kJ mol-1) est relativement faible par rapport à la liaison carbone-carbone (346 kJ mol-1) (Mercier et Godard, 2001). Cette liaison de nature fragile, est plus apte à subir une rupture homolytique.

D'après Rahman (2007), les radicaux sont formés à partir de dérivés de l'oxygène et de l'azote. Selon le même auteur, les radicaux libres ont des sources miltiples, dont l'une serait la chaîne respiratoire mitochondriale. Lors d'une forte production d'espèces réactives oxygénées ou azotées (ROS, *Reactive Oxygen Species* et RNS, *Reactive Nitrogen Species*), des dommages pourraient être causés au niveau de la mitochondrie, entraînant une forte diminution de l'ATP (adénosine-triphosphate) et la mort des cellules par nécrose (mort non programmée) (Pacher *et al.,* 2007; Pouillot *et al.,* 2011). Les ROS et les RNS proviennent aussi de divers mécanismes physiologiques (la lutte anti-infectieuse ou l'activité enzymatique) ou de mécanismes exogènes (les fumées, le rayonnement ionisant, le tabac, l'alcool et le sport intensif). Pour lutter contre ce phénomène, des molécules antioxydantes sont utilisées pour l'empêcher ou le retarder (Pacher *et al.,* 2007).

1.3 Cas particulier de l'oxygène

Il y a plus de 2 milliards d'années que l'oxygène est apparu par l'intermédiaire de la photosynthèse des cyanobactéries. Ces cyanobactéries ou algues bleues en capturant le carbone du dioxyde de carbone

sont capables de rejeter du dioxygène (Gardes-Albert *et al.*, 2003). L'oxygène étant nécessaire aux organismes aérobies, ceux-ci l'utilisent comme source d'énergie par son rôle d'accepteur final d'électrons au sein de la chaîne respiratoire mitochondriale. L'oxygène entraîne ainsi la production d'énergie par oxydation de la matière organique en donnant de l'ATP. L'eau représente en moyenne 70% de notre organisme. Les radicaux libres les plus présents proviendraient de l'oxydation des molécules d'eau. C'est ce que l'on appelle le mécanisme de radiolyse de l'eau (Gambini et Granier, 2013). Il faut souligner que dans le milieu biologique, les phénomènes de stress oxydant interviennent par les atomes d'oxygène essentiellement et que le métabolisme normal de l'oxygène se fait continuellement en faible quantité. L'oxygène constitue le receveur universel d'électrons à la fin de la chaîne respiratoire cellulaire. La molécule d'oxygène/dioxygène a une structure de biradical stable car elle possède deux électrons libres, et possède ainsi une forte affinité électronique (Debydupont *et al.*, 2002; Rochette, 2008).

1.4 Principales espèces réactives de l'oxygène (ROS)

La production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) est la conséquence directe de la vie aérobie. Chez les plantes, les ROS sont produits dans différents compartiments cellulaires et sont des espèces oxydantes, en particulier les radicaux hydroxyles et l'oxygène singulet, qui peuvent produire de graves dommages dans les systèmes biologiques (stress oxydatif). Cependant, les cellules végétales ont également une gamme d'antioxydants qui, normalement, peuvent piéger les oxydants en excès produits et ainsi éviter des effets délétères sur les biomolécules des cellules végétales (Del Rio, 2015).

Les ROS sont soient radicalaires (radicaux libres de l'oxygène à proprement dit) ou non radicalaires (certains dérivés oxygénés réactifs ne possédant pas d'électron célibataire). Les ROS les plus importants comprennent: l'anion superoxyde (O2 * $^-$), le radical hydroxyle (OH *), le radical hydroperoxyle (HO2 *), le peroxyde d'hydrogène (H2O2) et l'oxygène singulet ((1) O2 * -) (Debydupont *et al.*, 2002; Rutkowski *et al.*, 2007).

Les effets bénéfiques des ROS comme les RNS (par exemple le radical superoxyde et l'oxyde nitrique) se produisent à des concentrations faibles ou modérées. Elles jouent des rôles physiologiques dans les réponses cellulaires à la noxie, comme par exemple dans la défense contre les agents infectieux, dans certaines fonctions cellulaires à travers les voies de signalisation et d'induction d'une réponse mitogène. Un nombre croissant de preuves montre que les ROS dans les cellules agissent comme des

messagers secondaires dans les cascades de signalisation intracellulaire qui induisent et maintiennent le phénotype oncogène des cellules cancéreuses, cependant, les ROS peuvent également induire la sénescence et l'apoptose cellulaires et peuvent donc fonctionner comme anti-tumorigènes. Ironiquement, diverses actions médiées par les ROS protègent les cellules contre le stress oxydatif induit par les ROS et rétablissent ou maintiennent «l'équilibre redox» appelé aussi «homéostasie redox» (Choe et Min, 2005; Hennebelle, 2006; Valko *et al.*, 2007).

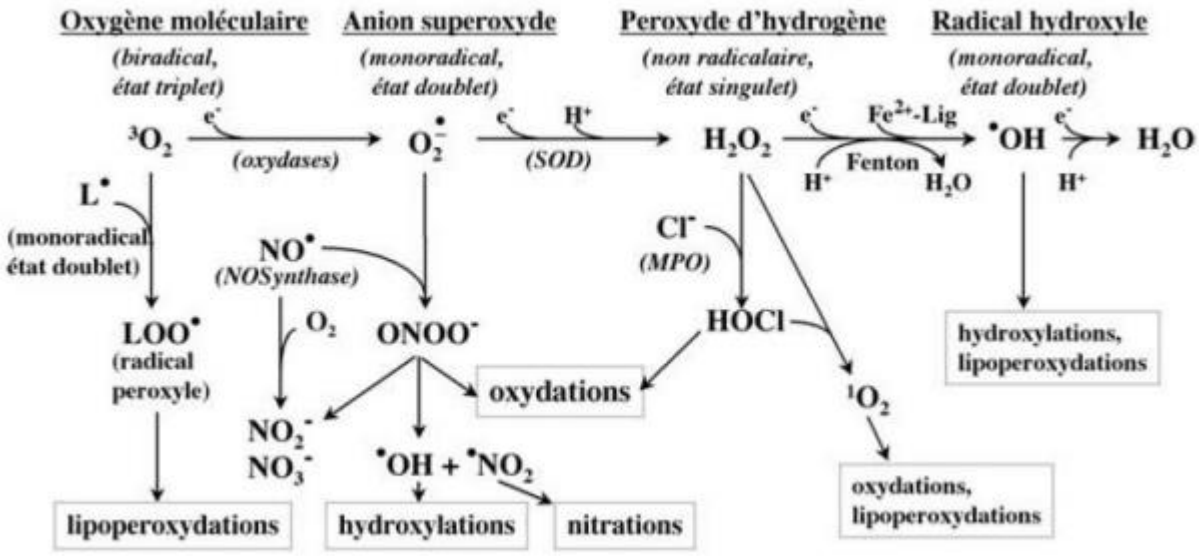


Figure 37: Principales espèces réactives de l'oxygène (Debydupont et al., 2002)

La surproduction de ROS peut entraîner un stress oxydatif, un processus délétère qui peut être un médiateur important des dommages aux structures cellulaires, y compris les lipides et les membranes, les protéines et ADN.

1.5 Espèces reactives à l'azote (RNS)

Les RNS et ROS sont normalement générés par des enzymes étroitement régulées, telles que les isoformes de NAD (P) H oxydase et NO synthase (NOS), respectivement (Valko *et al.*, 2007).

Le terme espèce azotée réactive (RNS) comprend principalement des radicaux comme l'oxyde nitrique (NO·) et le dioxyde nitrique (NO2.), ainsi que l'acide nitreux (HNO2) et le tétroxyde de diazote (N2O4), entre autres (Del Río, 2015).

Les ROS/RNS sont bien connus pour jouer un double rôle en tant qu'espèce à la fois délétère et bénéfique. Les espèces réactives à l'azote (RNS) telles que l'oxyde nitrique (NO) ou l'anion peroxinitrite (ONOO-) ont une activité physiologique ou réagissent avec différents types de molécules pour former des produits toxiques. Les RNS tout comme les ROS sont importants dans le processus de génération d'énergie, la peroxydation des lipides, l'oxydation des protéines et de l'ADN, la nitration, la nitrosation ou la nitrosylation et la réponse aux catécholamines. Les ROS/RNS sont neutralisées par une activité enzymatique ou des antioxydants naturels qui arrêtent la formation initiale de radicaux. La surproduction de ROS ou RNS entraîne un stress «oxydatif» ou «nitrosatif» qui contribue à une variété de processus pathologiques typiques de différentes maladies cancéreuses, neurodégénératives, virales, toxiques ou inflammatoires (Rutkowski *et al.,* 2007; Valko *et al.,* 2007).

1.6 Mécanisme du stress oxydatif

Précisons que le stress oxydatif est défini par un déséquilibre entre la production des espèces radicalaires et les capacités de défense antioxydante de l'organisme (Beaudeux et Durand, 2011). Autrement dit, c'est quand le nombre de radicaux libres (alimentation, pollution, etc) augmente ou quand le système de protection perd de son efficacité (mutation, inactivation d'enzymes, etc). La production d'espèces réactives de l'oxygène est bien utile mais pourrait être néfaste pour l'organisme lorsqu'il y a une production excessive et en l'absence de mécanismes de défense. C'est cela **le stress oxydatif.** Celui-ci pourrait favoriser la survenue de pathologies comme: les maladies cardiovasculaires, les maladies dégénératives, les cancers ainsi qu'un vieillissement prématuré (Belaïch et Boujraf, 2016) sans oublier des dégradations de cibles (protéines, lipides et ADN) (Harman, 2002). Beaudeux et Durand, (2011) soutiennent également que le stress oxydatif pourrait entraîner une suite d'évènements cellulaires et moléculaires ayant pour conséquences la mort cellulaire, des dysfonctionnements de la signalisation cellulaire, des altérations de l'infrastructure cellulaire, des réponses inflammatoires, une modulation de la prolifération et de différenciation cellulaire. Par ailleurs, ils déclarent que de nos jours, le stress oxydant est reconnu comme un facteur d'inflammation et de mutagenèse. Les lipides, plus particulièrement les acides gras poly-insaturés sont hautement sensibles aux radicaux, ce qui explique l'effet délétère de ces espèces chimiques hautement réactives sur la structure des membranes cellulaires.

Les radicaux qui sont issus de l'oxygène ont un effet particulièrement destructeur au niveau cellulaire.

Pendant le processus de stress oxydatif, ces radicaux échappent aux défenses anti-oxydantes de la cellule et modifient les composants cellulaires (acides nucléiques, protéines, lipides) par production d'AGE (Advanced Glycation Endproducts) et d'ALE (*Advanced Lipoxidation Endproducts*) (Rahman, 2002; Baudin, 2006).

1.7 Systèmes de défense contre le stress oxydant

Dans le système de defense contre le stress oxydant, les composés phénoliques, les caroténoïdes, les enzymes, les vitamins et les oligoéléments forment le maillon des biomolécules actives qui agissent comme des antioxydants qui anéantissent les effets nocifs des radicaux libres. Ces molécules bioactives en fonction de leur structure et de réaction contre les radicaux libres peuvent être des antioxydants liposolubles, hydrosolubles et polyphénoliques.

1.8 Molécules antioxydantes

Par definition, un antioxydant est une molécule qui previent ou qui retarde l'oxydation engendrée par les ROS ou les RNS. Ils sont présents à des concentrations plus faibles que les substrats oxydables. Ils agissent en piégeant les radicaux formés, en une forme stable ou en les dismutant. Des antioxydants comme les polyphénols, les tocophérols, la vitamine A, la vitamine C, les caroténoïdes pourront soit réduire soit empêcher l'oxydation des substances chimiques.

a) Polyphénols

Les molécules polyphénoliques sont des antioxydants hydrosolubles et elles constituent l'une des plus grandes familles dans le règne végétal. En leur sein, les flavonoïdes occupent une bonne place dans la gestion du stress oxydant. Elles sont caractérisées par une structure commune de type 2-phénylbenzopyrane. Leur capacité antiradicalaire serait dans leur faculté à « terminer » les chaines radicalaires par des mécanismes de transfert d'électrons et de protons. Elles peuvent aussi chélater les ions des métaux de transition pouvant catalyser la peroxydation lipidique (Schroeter *et al*., 2002; Leopoldini *et al.*, 2011).

Dans une expérimentation réalisée par Kahraman et Inal en 2002, il a été demontré que la quercétine peut protéger l'activité des enzymes antioxydantes après l'action des UV. Les travaux de Katiyar et collaborateurs en 1999, ont prouvé que l'application de l'épigallocatéchine sur la peau de souris à la

suite d'une exposition aux UVB, avait entraîné une inhibition de la production de peroxyde d'hydrogène.

b) Vitamine C

La vitamine C aussi appelée acide ascorbique est un antioxydant hydrosoluble. C'est un puissant réducteur. Dans la defense contre le stress oxidant, elle réagit avec les ROS et particulièrement avec l'anion superoxyde. N'étant pas stable, elle est présente sous sa forme anionique. Elle piège les radicaux peroxyles et limite la peroxydation lipidique. Son radical ascorbyl est capable de régénérer les tocophérols oxydés en réduisant leur radical tocophéryl (Chen *et al.,* 2012). Elle peut réduire les MMP (Métalloprotéinases matricielles) et peut agir comme cofacteur pour les enzymes entrant dans la synthèse de collagène. Elle réduit les taches pigmentaires en inhibant la tyrosinase (Chang, 2012). Elle protège la barrière épidermique en maintenant l'hydratation de la peau. Il est à noter qu'à fortes concentrations et en présence de fortes doses de fer, la vitamine C peut devenir pro-oxydante.

c) Vitamine E

Il est à préciser que la vitamine E est le terme générique utilisé habituellement pour désigner les différents tocophérols et tocotriénols (c'est un ensemble de 8 molécules reparties en 4 tocophérols et 4 tocotriénols). Les tocophérols sont des antioxydants liposolubles. La vitamine E représente le principal antioxydant dans les membranes cellulaires. Dans leur réaction antiradicalaire, ils agissent sur la membrane en protégeant les acides gras de la peroxydation lipidique en neutralisant les radicaux (peroxyle, alkyle et alcoxyde). Ils interviennent dans la diminution du taux de MMP-1 (Chen *et al.,* 2012).

d) Caroténoïdes

Les caroténoïdes sont synthétisés par les végétaux et les microorganismes et ils sont regroupés en 2 grandes familles à savoir les carotènes et les xanthophylles. Ils ont des capacités antioxydantes similaires à celles des tocophérols. Ils constituent une grande famille de polyènes conjugués pigmentaires. Ces molécules bioactives sont constituées de 40 atomes de carbone formés de 8 unités isoprène à des extrémités pouvant être cycliques. Grâce à leur longue chaîne carbonée riche en doubles liaisons, les caroténoïdes sont d'excellents piégeurs de radicaux peroxyles et d'oxygène singulet (Valko *et al.,* 2006).

e) Oligoéléments

Des oligoéléments comme: Cu, Zn, Mn, Se et Cr peuvent aussi piéger les radicaux libres. Le zinc représente l'un des cofacteurs de la SOD (Superoxyde dismutase). Il peut protèger les groupements thiols des protéines et inhiber partiellement les réactions de formation des ROS résultants du fer et du cuivre (Mezzetti *et al.*, 1998). Il peut aussi engendrer une production de métallothionéines (protéines antioxydantes). Le selenium (Se) peut détoxifier les radicaux libres produits lors du métabolisme cellulaire. Cet effet lui confère un rôle d'anticancéreux et d'antivieillissement (Wolters *et al*., 2005). C'est aussi l'un des oligoéléments essentiels constituant le glutathion péroxydase. Le sélénium associé à la vitamine E peut diminuer les cloques provoquées par une exposition aux UV et la pigmentation (Chen *et al*., 2012).

f) Enzymes

Les mitochondries sont le site majeur de production de radicaux libres. Elles sont fortement enrichies en antioxydants tels que la superoxyde dismutase, la catalase et la glutathion peroxydase (Valko *et al.*, 2007). Un manque d'oligoéléments comme le cuivre, le manganèse, le zinc et le sélénium ou de vitamines comme la riboflavine, conduit à l'inactivation de ces enzymes antioxydantes (Wolters *et al*., 2005).

➢ Superoxyde dismutase (SOD)

La superoxyde dismutase fait partie des antioxydants luttant contre le stress oxydatif. Elle agit lors de la formation des ROS en catalysant la dismutation de l'ion superoxyde en deux produits moins toxiques: le peroxyde d'hydrogène et l'oxygène moléculaire. C'est une enzyme ubiquinone, elle participe au transfert des électrons dans la membrane interne de la mitochondrie. Principalement, il existe 3 formes de SOD qui diffèrent de par leurs ions cofacteurs:

- La SOD-Cu/Zn peut être soit extracellulaire, soit présente dans la mitochondrie. Elle se retrouve chez les mammifères, chez les procaryotes et chez certaines plantes.

- La SOD-Mn est présente dans le cytosole, dans les mitochondries des cellules eucaryotes et les cellules procaryotes.

- La SOD-Fe est présente dans les bactéries, chez les cellules procaryotes et chez certains végétaux.

C'est important de signaler que la superoxyde dismutase à manganèse (SOD-Mn) et la superoxyde dismutase à cuivre et zinc (SOD Cu/Zn) sont les premières lignes de défense cellulaire contre le stress oxydatif (Gate *et al.,* 1999). Pendant la production de l'anion superoxyde, ces formes de SOD permettent d'éviter la production de ROS. Elle décroit avec l'âge, c'est pour cela que des extraits titrés en SOD font leur apparition, surtout en cosmétique pour lutter contre les signes de vieillissement.

- **Catalase (CAT)**

La catalase, une enzyme tétramétique, agissant dans la détoxification cellulaire. Elle est constituée d'acides aminés et de groupements hème (possédant un atome de fer) et du NADPH (protection contre H_2O_2). Elle permet la dismutation du peroxyde d'hydrogène (pour des concentration élevée) ou l'eau oxygéné en eau et dioxygène (Gate *et al.*1999 et Seifried *et al.*, 2007). Elle permet de protéger l'organisme de l'action de H_2O_2. La dismutation se définit comme une réaction d'oxydoréduction dans laquelle la même espèce chimique servirait d'oxydant et de réducteur. Dans l'organisme, elle se localize plus particulièrement dans le foie et les globules rouges.

- **Glutathions peroxydases (GPx)**

Ce sont des antioxydants hydrosolubles comme la vitamine C.

Les glutathions peroxydases peuvent détoxifier trois espèces réactives H_2O_2, les hydroperoxydes lipidiques et les peroxynitrites.

- Le glutathion peroxydase à sélénium va éliminer le peroxyde d'hydrogène (à de faible concentration) dans les tissus.

- Le glutathion réductase associer au NADH (nicotinamide adénine dinucléotide phosphate) va régénérer la glutathion réduit.

Enfin, le glutathion peroxydase agit pour transformer les peroxydes en eau (Masella *et al.*, 2005; Delattre *et al.*, 2005; Haleng *et al.*, 2007).

$$H_2O_2 + 2GSH \longrightarrow H_2O + GSSG$$

$$2GSSG + 2NADPH + H^+ \longrightarrow 2\,GSH + NADP^+$$

1.9 Pouvoir antioxydant

L'organisme est capable de mettre en place, dans une certaine mesure, un système de defense, permettant de limiter les dommages des radicaux libres. Ce système de defense enzymatique et chimiques de l'organisme est mise en place grace à l'intervention des molécules bioactives et enzymes précédemment citées **(Hennebelle, 2006).** Elles sont exogènes et endogène à l'organisme.

Les molécules ou microconstituants appelés antioxydants, sont capables d'interférer avec les radicaux libres et limiter leur dégats sur la structure cellulaire de l'organisme. Valko *et al.*, (2006) soulignent qu'un bon antioxydant possède les qualités ci-dessous:

- pouvoir piéger directement et de manière spécifique des radicaux libres;

- Chélater des ions de métaux de transition (Fe^{2+}, Cu^{2+}) d'importance biologique capables de promouvoir la production de radicaux libres par la réaction de Fenton;

- Interférer avec d'autres antioxydants, et, dans la mesure du possible, les régénérer;

- Avoir un effet positif sur l'expression génique;

- Être rapidement absorbé;

- Avoir une concentration qualifiée de « physiologique » dans les fluides biologiques et dans les tissus;

- Être efficace dans le milieu membranaire tout comme dans un milieu aqueux.

Ces actions antiradicalaires permettent à l'organisme de reprendre sa santé et d'être vigoureux.

1.10 Intérêts des actifs anti-oxydants de la banane

La banane est une bonne source d'antioxydants à haute valeur nutritionnelle et médicinale dont les principaux composés phytochimiques sont: les composés phénoliques, les caroténoïdes, et les amines biogènes. La banane aurait une activité antioxydante plus élevée que certains fruits tels que le citron, la pastèque, la tomate et la nectarine grâce à ces composés phytochimiques ci-dessus cités (Flogel *et al.*, 2011, Singh *et al.*, 2016).

Dans une expérimentation effectuée par Baldi *et al.,* (2012), l'administration d'un extrait alcoolique de banane à des souris a relevé une diminution des peroxydes lipidiques et une augmentation du glutathion. Ils soutiennent que la banane associée aux antioxydants consommés quotidiennement, aiderait à lutter contre les excès de radicaux libres.

Les flavonoïdes de la banane contribuerait bien à lutter contre les dommages causés par le stress antioxydant (Sundaram *et al.*, 2011). Ils stimulent l'activité de la superoxyde oxydase dismutase (SOD) et de la catalase. Cette stimulation va entraîner la diminution du taux des produits provenant de la peroxydation lipidique tel que le malondiadéhyde (dérivé de la peroxydation lipidique), les hydroperoxides et les diènes conjugués (marqueurs du stress oxydatif) (Vijayakumar *et al*., 2009). La puissance antioxydante de la banane serait attribuée également à des niveaux élevés de dopamine dans la peau et dans la pulpe (Kanazawa et Sakakibara, 2000). Elle aurait un taux de piégeage des radicaux plus rapide que la catéchine et similaire à celui des antioxydants puissants (gallocatéchine, gallate et acide ascorbique) (Kondo *et al.,* 2005; Lim *et al.,* 2007). Les mêmes publications notent par ailleurs que les catéchines identifiées dans la banane ont des effets antioxydants contre l'auto-oxydation lipidique.

Sulaiman *et al.* (2011) ont étudié la corrélation entre le contenu phénolique total et minéral avec les activités antioxydantes des pulpes et des pelures de huit cultivars de bananier et ont prouvé que l'activité antioxydante de la banane n'est pas seulement due à sa teneur phénolique, mais aussi à de nombreux autres composés, tels que la vitamine C, vitamine E et β-carotène, qui pourraient être responsables de l'augmentation du potentiel antioxydant.

La pulpe de banane comestible a un taux d'acide ascorbique compris entre 6,9 et 10 mg / 100 g, l'un des antioxydants hydrosolubles de la banane le plus puissant connu (Kanazawa et Sakakibara, 2000).

Selon Singh *et al.,* (2016), les caroténoïdes procurent des bienfaits pour la santé du consommateur en raison de leurs fonctions physiologiques uniques, telles que les provitamines et leur rôle en tant qu'antioxydants, en particulier dans la récupération de l'oxygène singulet.

La peau de banane, qui est souvent jetée, serait une bonne source de composés bioactifs et de fibres alimentaires. Elle contient des composés antioxydants comme la dopamine, la dopa, l'acide ascorbique, la rutine, les carotènes, les tocophérols et les catécholamines. Elle serait même plus antioxydante que la

pulpe (Someya *et al.*, 2002). Des extraits de peau de banane ont présenté une grande capacité à piéger les radicaux libres DPPH et ABTS et ils sont de bons inhibiteurs de la peroxydation lipidique (González-Montelongo *et al.*, 2010).

1.11 Méthodes de dosage de l'activité antioxydante

Il existe diverses méthodes de dosage de l'activité antiradicalaire *in vitro*. Dans cette partie, nous aborderons celles qui témoignent de l'aptitude d'une molécule ou d'un extrait naturel à piéger des radicaux libres, par transfert d'électron et/ou de proton, issus de phénomènes d'oxydations (Prior *et al.*, 2005). Il faut cependant retenir, qu'il existe d'autres méthodes de dosage de l'activité antioxydante in vitro induisant la mesure de l'inhibition de l'oxydation des lipides et des lipoproteins et celles qui peuvent mesurer le pouvoir antioxydant *in vivo* sur le modèle animal ou chez l'Homme.

Ces méthodes ci-dessous mentionnées dans le tableau 9, sont les plus utilisées. Dans cette partie, nous parlerons des mécanismes réactionnels, les avantages et inconvénients de chaque méthode citée. Ce sont des tests *in vitro* chimiques.

Les tests antioxydants *in vitro* biologiques sont souvent difficiles à accéder en raison de leur caractère commercial (brevets). Néanmoins, des articles scientifiques mentionnent quelques tests qui sont présentés dans le Tableau 10.

Les résultats d'activité antioxydante sont généralement exprimés en fonction du Trolox®, qui est une molécule de référence possédant de forte propriété antioxydante. Il est un analogue hydrosoluble de la vitamine E.

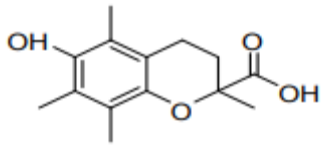


Figure 38: Structure chimique du Trolox

Tableau 10: Description de quelques tests antioxydants in vitro chimiques

QUELQUES TESTS *IN VITRO* CHIMIQUES				
Tests	**DPPH**	**ABTS ou TEAC**	**FRAP**	**ORAC**
Mécanismes réactionnels	Transfert d'électron majoritaire	Transfert d'électron et de proton	Transfert d'électron	Transfert de proton
Nature des molécules testées	Hydrophiles et lipophiles	Hydrophiles et lipophiles	Hydrophiles	Hydrophiles et lipophiles
Expression des résultats	CI50 et/ou en mg ou µmol équivalent Trolox®	CI50 et/ou en mg ou µmol équivalent Trolox®	En mg ou µmol équivalent Fe^{2+}	CI50 et/ou en mg ou µmol équivalent Trolox®
Avantages	Très facile à mettre en œuvre; Peu couteux	Très facile à mettre en œuvre; Cinétique de réaction très rapide ; Peu couteux	Très facile à mettre en œuvre; Peu couteux	Facile à mettre en œuvre Couteux (nécessité d'un fluorimètre) Utilisation d'un générateur de radicaux (ROO•)
Inconvénients	Encombrement stérique de molécules à hauts poids moléculaires; Interférences	Produits de dégradation antioxydants; Radical inexistant	pH utilisé non physiologique; Interférences possibles à 595 nm;	Mécanismes de génération des ROO• non physiologique;

	possibles à 515 nm; Forte dépendance au pH et au solvant; Radical inexistant *in vivo*	*in vivo*	Interférences avec composés possédant E°< 0,77 V	Iinterférences possibles des protéines
Références	**(Brand-Williams et al., 1995; Pinelo *et al.*, 2004)**	**(Awika et al., 2003; Arts et al., 2004; Osman *et al.*, 2006)**	**(Benzie et Strain, 1996; Ou et al., 2002)**	**(Ou et al., 2001; Lopez *et al.*, 2003)**
	(Prior *et al.*, 2005)			

Légende: DPPH: 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle ; **ABTS:** 2,2'-azino-bis-(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonate); **TEAC:** Trolox equivalent antioxidant capacity; **FRAP:** Ferric Reducing Antioxidant Power; **ORAC:** Oxygen Radical Absorbance Capacity; **IC50 :** Concentration Inhibitrice de 50% de l'activité.

Tableau 11: Description de quelques tests in vitro biologiques

TESTS *IN VITRO* BIOLOGIQUES			
Tests	**KRL**	**CAP-e**	**ROS-PMN**
Substrat ou réactif utilisé	Erythrocytes; Sang total	Erythrocytes	Leucocytes
Mécanismes réactionnels	Mécanismes enzymatiques et chimiques	Aptitude des AO a pénétrer et piéger les radicaux	Aptitude des AO à pénétrer et piéger les radicaux ; Inhiber la formation des EOR par les leucocytes polynuclaires (mécanisme anti-

			inflammatoire); Effet pro-inflammatoire
Nature des molécules testées	Hydrophiles et lipophiles	Hydrophiles et lipophiles	Hydrophiles et lipophiles
Expression des résultats	% du temps de demi-hémolyse En mg ou µmol équivalent ®Trolox, acide gallique	•en mg ou µmol équivalent Trolox®, acide gallique	Concentration en extrait
Avantages	limitation des solvants; Utilisation d'un générateur de radicaux; Attaque radicalaire continue et progressive	Limitation des solvants; Utilisation d'un générateur de radicaux	Très similaire au test CAP-e avec en plus des effets anti-inflammatoires
Inconvénients	Accès difficile au brevet; Couteux	Attaque radicalaire uniquement initiale; Accès difficile au brevet; Etude uniquement qualitative	Utilisation de H_2O_2 Accès difficile au brevet; 3 mécanismes d'action
Références	**(Prost, 1989; Blache**	**(Honzel *et al.*, 2008; Kang *et al.*, 2010)**	

	et Prost, 1992)	

Légende: KRL: Khan Research Laboratories; **ROS:** Reactive oxygen species; **PMN:** Polymorphonuclear neutrophils

1.12 Mitochondries et le statut antioxydant

a) Structure

D'après Farhat, (2015), la mitochondrie est un organite possèdant les caractéristiques d'un organisme procaryote, qu'on retrouve chez la plupart des eucaryotes. Elle est composée de deux compartiments (matrice et espace intermembranaire), qui sont délimités par deux membranes (interne et externe). Elle possède son propre ADN (ADNmt) qui code pour treize protéines de la chaîne respiratoire et de la phosphorylation oxydative (figure ci-dessous).

Sa membrane externe est une bicouche phospholipidique relativement simple, renfermant des porines qui la rendent perméable aux molécules hydrophiles de faible masse moléculaire telles que les anions, les cations, les acides gras, le pyruvate ou les nucléotides.

La structure de sa membrane interne est très différente de celle externe. Elle forme des invaginations qui forment des crêtes, augmentant ainsi sa surface. Elle est beaucoup moins perméable que la membrane externe mitochondriale et héberge des transporteurs, les enzymes de la chaîne respiratoire et le complexe F0-F1 ATP synthase.

L'espace inter-membranaire contient des protons qui proviennent du fonctionnement de la chaîne respiratoire ainsi que des enzymes de type kinases comme par exemple la créatine kinase qui catalyse la conversion de la créatine en phosphocréatine, impliquant la conversion de l'ATP en ADP.

Enfin, la matrice contient des enzymes qui interviennent dans les phénomènes de réplication, de transcription et de traduction du matériel génétique mitochondrial, mais aussi des enzymes qui sont responsables de la β-oxydation, des réactions du cycle de l'acide citrique (cycle de Krebs) et de défense antioxydante (Mn-SOD).

Dans un premier temps, les mitochondries ont été considérées comme des structures ovoïdes bien individualisées. Récemment, cette hypothèse a été mise en cause et il a été prouvé qu'elles sont en réalité organisées en réseaux qui constituent une structure dynamique qui fissionne et fusionne

constamment au sein de la cellule (Van der Bliek *et al.*, 2013). Selon les mêmes auteurs, les mitochondries peuvent ainsi changer continuellement de forme grâce aux actions combinées de fission, de fusion et de mouvement le long des pistes cytosquelettiques. Dans certaines cellules, les mitochondries fusionnent ensemble en formant un seul réseau fermé, tandis que dans d'autres cellules ou dans des circonstances différentes, les mitochondries peuvent se transformer en un grand nombre de petits fragments.

La longueur du réseau mitochondrial et le niveau de fermeté des réseaux sont déterminés par l'équilibre entre les taux de fission et de fusion. Ces taux sont influencés par les conditions métaboliques et pathogènes à l'intérieur des mitochondries et par leur environnement cellulaire. Cependant, il est important de rappeler que le rôle physiologique primordial de la mitochondrie est la production d'énergie sous forme d'ATP au niveau de sa membrane interne via la phosphorylation oxydative (Chan, 2012; Nunnari et Suomalainen, 2012).

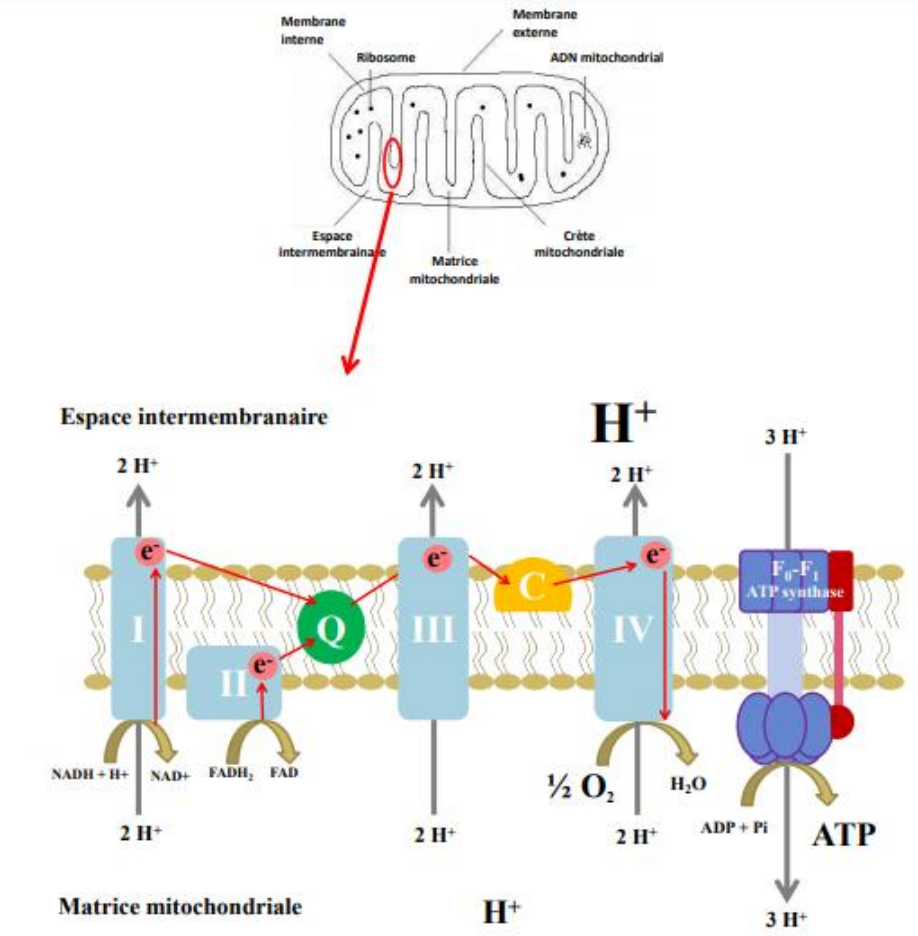


Figure 39: Structure de la mitochondrie et fonctionnement de la chaîne respiratoire et de la phosphorylation oxydative (Farhat, 2015).

b) Protéines médiatrices des phénomènes de fission et de fusion des mitochondries

Les phénomènes de fission et de fusion sont importants pour la croissance, pour la redistribution mitochondriale et pour le maintien d'un réseau mitochondrial sain. Leurs fonctions sont contrôlées par différents ensembles de protéines adaptatrices à la surface des mitochondries et par une gamme de processus de régulation (Westermann, 2010).

La première protéine ou dynamine de médiation des phénomènes de fission et de fusion des mitochondries a été découverte dans le gène de la levure. Cette protéine est connue sous le nom de Mgm1, elle provoquait un défaut de maintien du génome mitochondrial de la levure. Elle est ancrée dans la membrane interne mitochondriale. Une seconde protéine de la membrane externe mitochondriale, dénommée Marf, s'est par la suite révélée médiatiser la fusion dans d'autres types de cellule (Ishihara *et al.*, 2004; Dorn *et al*., 2011).

Chez les mammifères, il existe 2 protéines homologues appelées mitofusines (Mfn1 et Mfn2), qui sont également capables de soutenir la fusion mitochondriale (Chen *et al*., 2003). Pernas et Scorrano, (2016), rapportent que la fusion mitochondriale est assurée par les mitofusines 1 et 2 (Mfn1 et Mfn2) et l'atrophie optique 1 (OPA1), qui interviendraient respectivement dans la fusion OMM et IMM.

La fusion de la membrane externe mitochondriale est presque toujours coordonnée avec celle de la membrane interne. Cependant, il existe des cas dans lesquels la fusion de la membrane externe peut se produire sans fusion concomitante de la membrane interne (Olichon *et al*., 2002; Olichon *et al.*, 2003).

Contrairement à la machinerie de fusion, qui a à la fois des composants membranaires externes et internes, la fission mitochondriale implique une seule protéine appelée Drp1. La protéine Drp1 possède une structure de domaine semblable à celle des protéines de fusion des membranes externe et interne. Ses différents domaines sont la GTPase suivi d'un domaine intermédiaire, d'un domaine variable et d'un domaine effecteur GTPase (GED) (Olichon *et al*., 2007; Toyama *et al.*, 2016). Kraus et Ryan en 2017, rajoutent que la constriction et la scission mitochondriales sont effectuées respectivement par les protéines 1 (Drp1) et Dynamin2 (Dnm2) liées à la dynamine.

La fission mitochondriale se caractérise par la division d'une mitochondrie en 2 mitochondries filles, par contre la fusion mitochondriale est l'union de deux mitochondries pour former une mitochondrie. Ces 2 phénomènes se traduisent soit par un réseau fragmenté caractérisé par un grand nombre de petites mitochondries de forme ronde, soit par un réseau hyperfusé avec des mitochondries allongées et étroitement connectées (Wai et Langer, 2016; Garone *et al.*, 2018).

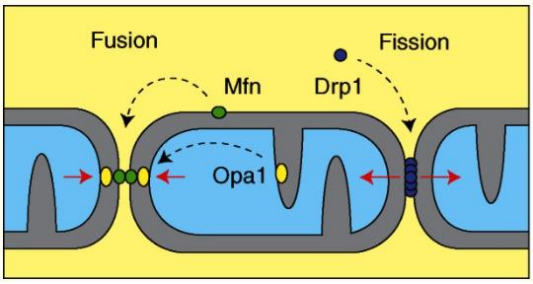


Figure 40: Phénomènes de fusion et de fission de la membrane externe michondriale chez les mammifères (van der Bliek, 2013).

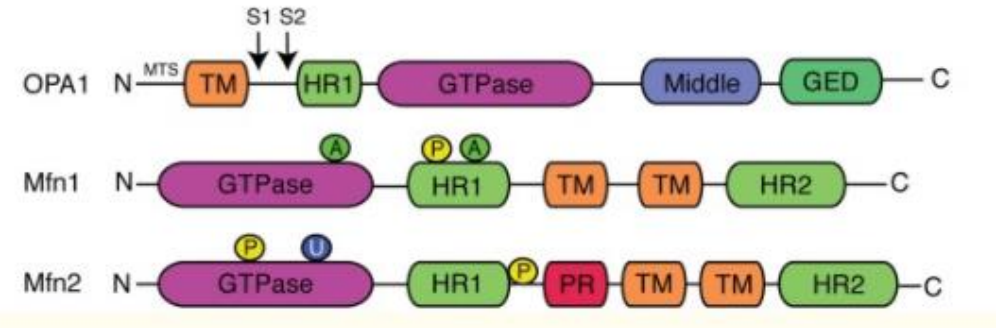


Figure 41: Représentation des éléments structuraux des protéines de fusion et leurs modifications post-traductionnelles (Garone et al., 2018).

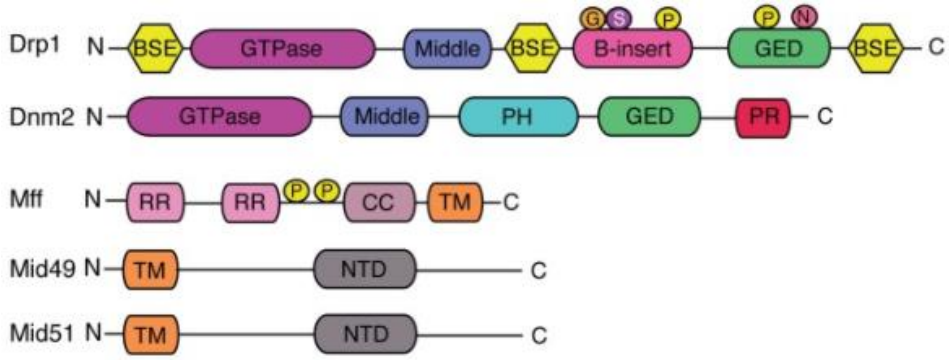


Figure 42: Représentation des éléments structuraux des protéines de fission et leurs modifications post-traductionnelles (Garone et al., 2018).

c) Mitochondrie et la production des ROS

Dans la mitochondrie, la production de ROS est liée au flux d'électrons dans la chaîne respiratoire mitochondriale et également au degré de réduction des transporteurs d'électrons. La fuite d'électrons se produit principalement au niveau du coenzyme Q ou ubiquinone. Lorsque la coenzyme Q accepte les électrons provenant des complexes I et II, il les fait passer au complexe III (Andreyev *et al*., 2005). Au sein de la coenzyme Q, il se produit une serie de réactions d'oxydation et de réduction. C'est ainsi qu'elle est réduite par la prise en charge des électrons provenant des complexes I ou II et l'on assiste à la formation de l'ubiquinol (QH2). L'ubiquinol étant réduite par le complexe III, il se transforme en une forme radicalaire de l'ubiquinone appelée la semiquinone (QH•). La semiquinone (QH•) va catalyser le transfert direct d'un électron à l'oxygène, induisant la réduction univalente de ce dernier et ainsi sa transformation en anion superoxyde (Jastroch *et al*., 2010; Mailloux et Harper, 2011).

La production radicalaire au sein des mitochondries est variable selon les stades respiratoires 3 ou 4. En stade 3, le potentiel membranaire n'est pas fort en raison de la diminution du gradient de protons, ainsi la production d'anion superoxyde pourrait bien diminuer. En stade 4, le potentiel membranaire est élevé en raison d'une augmentation de la force protomotrice, la production d'anion superoxyde augmente. Cette production des ROS peut altérer le fonctionnement de la chaîne respiratoire mitochondriale soit directement par oxydation protéique, soit indirectement par oxydation de l'ADN mitochondrial (altération de la synthèse de complexes de transport des électrons) ou par peroxydation lipidique (modification des propriétés physico-chimiques des membranes mitochondriales) (Nicholls et Ferguson, 2002;-Tretter et Adam-Vizi, 2004; Cantu *et al*., 2009).

D'une part, les augmentations de la production de superoxyde cellulaire seraient impliquées dans le vieillissement des cellules (Dai *et al.,* 2014) dans des maladies cardiovasculaires, l'hypertension, l'athérosclérose et lésions vasculaires associées au diabète, ainsi que dans les maladies neurodégénératives telles que la maladie de Parkinson, l'Alzheimer et la sclérose latérale amyotrophique (Lin et Beal, 2006 ; Jastroch *et al*., 2010), l'inflammation (Pelletier *et al*., 2012 ; Bordt et Polster, 2014) et de nombreuses autres pathologies (Lin et Beal, 2006; Tahara *et al.*, 2009).

D'autre part, les ROS dérivés des mitochondries, le peroxyde d'hydrogène en particulier, seraient également considérés comme nécessaires pour certains mécanismes de transduction du signal physiologique comme la stabilisation de la sous-unité HIF-1α du facteur inductible par l'hypoxie 1

(HIF-1) (Brunelle *et al.*, 2005) et pour le renouvellement des mitochondries endommagées (Twig *et al*., 2008 ; Joselin *et al.*, 2012). Toutes ces raisons explique l'intérêt de quantifier la production de superoxyde mitochondrial dans les cellules vivantes.

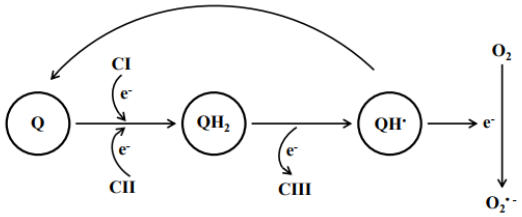


Figure 43: Sites et mécanisme de la fuite d'électrons (Jastroch et al., 2010).

d) Evaluation du statut antioxydant des Mitochondries

Les mitochondries sont les principales sources endogènes d'espèces réactives de l'oxygène (ROS). L'état redox des mitochondries est déterminé par les niveaux d'espèces réductrices et oxydantes au sein de l'organite. Cela reflète l'activité métabolique mitochondriale et la forme physique globale de l'organite (Liao *et al.*, 2020).

La détection et la mesure du taux de flux des différentes espèces réactives de l'oxygène (ROS), en particulier le superoxyde, dans les compartiments intracellulaires sont essentielles pour comprendre les activités biologiques des ROS spécifiques. Les dosages basés sur l'utilisation de MitoSOX sont largement utilisés pour détecter les espèces mitochondriales réactives de l'oxygène (ROS) en général et en particulier le superoxyde (Kauffman *et al.*, 2016).

Le MitoSOX Red est une sonde fluorescente qui permet de détecter les espèces mitochondriales réactives de l'oxygène par imagerie de cellules vivantes. Le groupement triphénylphosphonium lipophile chargé positivement dans le MitoSOX concentre le conjugué dihydroéthidium sensible à l'anion superoxyde dans la matrice mitochondriale (Roelofs *et al.*, 2015). D'autres sources d'information détaillent que le MitoSOX serait conçu en combinant l'ion triphénylphosphonium (TPP^+), un cation lipophile utilisé pour accumuler diverses molécules dans la matrice mitochondriale fortement chargée négativement, au dihydroéthidium, une sonde capable d'identifier le superoxyde cellulaire dans la matrice mitochondriale (Ross *et al.*, 2005; Roelofs *et al*., 2015). Lorsque la sonde est oxydée par un superoxyde, le dihydroéthidium (également appelé hydroéthidine) forme le produit d'oxydation spécifique du superoxyde 2-hydroxyéthidium, alors qu'il forme de l'éthidium et d'autres

sous-produits lorsque le MitoSOX est oxydé par des ROS autres que le superoxyde (Zielonka *et al.*, 2010). Les produits d'oxydation du dihydroéthidium et du MitoSOX présentent des spectres de fluorescence rouges qui se chevauchent largement, dont les intensités pourrait augmenter par la présence d'acides nucléiques (Zhao *et al*., 2005; Roelofs *et al*., 2015). Ainsi, l'accumulation de fluorescence rouge est utilisée comme indicateur de ROS mais sans pouvoir spécifier d'espèce particulière. Cependant, la quantification des produits d'oxydation du 2-hydroxyéthidium ou «mito» -2-hydroxyéthidium par chromatographie liquide haute performance est nécessaire pour mesurer spécifiquement le superoxyde (Zielonka *et al.*, 2010).

Dans une telle expérimentation, pour comprendre la distribution subcellulaire du colorant MitoSOX aux différentes concentrations prédéfinies dans les cellules vivantes, on peut utiliser simultanément le MitoTracker Green pour révéler la morphologie mitochondriale et le Hoechst pour colorer les noyaux. Ainsi, à des concentrations élevées de MitoSOX (5 µM à 10 µM par exemple), la morphologie mitochondriale peut être considérablement modifiée, avec l'apparition de nombreuses structures arrondies et distendues.

En plus de la méthode basée sur l'utilisation de MitoSOX, la chimiluminométrie dérivée de la lucigénine (LDCL) est également recommandées (Li *et al.,* 1998 ; Mukhopadhyay *et al*., 2007) . Pour la méthode de chimiluminométrie dérivée de la lucigénine, il est recommandé d'utiliser des concentrations de 5 à 100 µM de lucigénine.

L'un des inconvénients de l'utilisation de MitoSOX est la possibilité de diffusion dans le compartiment mitochondrial vers le cytosol lorsque la sonde est utilisée même à 5 µM. Cela peut rendre le test non sélectif pour la détection de superoxyde mitochondrial ou des ROS. A cette concentration classiquement utilisée, il a été constaté des perturbations de la chaîne de transport des électrons dans la cellule mitochondriale. Il faut ajouter la complexité d'interprétation des données (Roelofs *et al*., 2015).

De même, la méthode basée sur le test de chimiluminométrie dérivée de la lucigénine, serait critiquée pour le potentiel de la lucigénine à subir un cycle redox à des concentrations élevées, en particulier dans les systèmes artificiels acellulaires et physiologiquement non pertinents (Kauffman *et al.*, 2016).

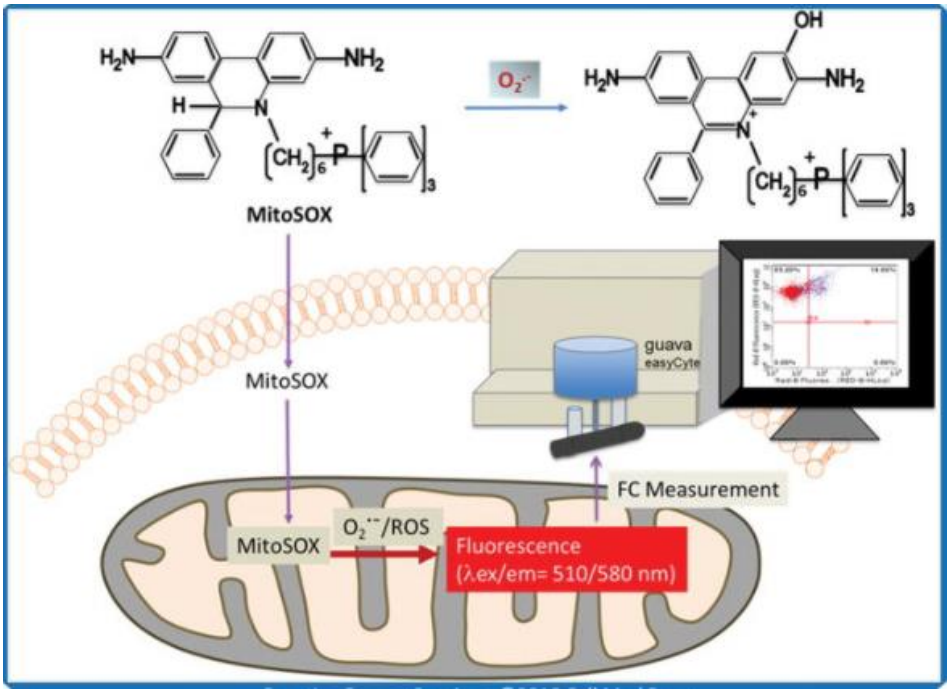


Figure 44: Illustration schématique de la cytométrie en flux basée sur MitoSOX pour la détection de ROS / superoxyde mitochondrial. La charge positive de MitoSOX est responsable de son accumulation intra-mitochondrial (Kauffman et al., 2016).

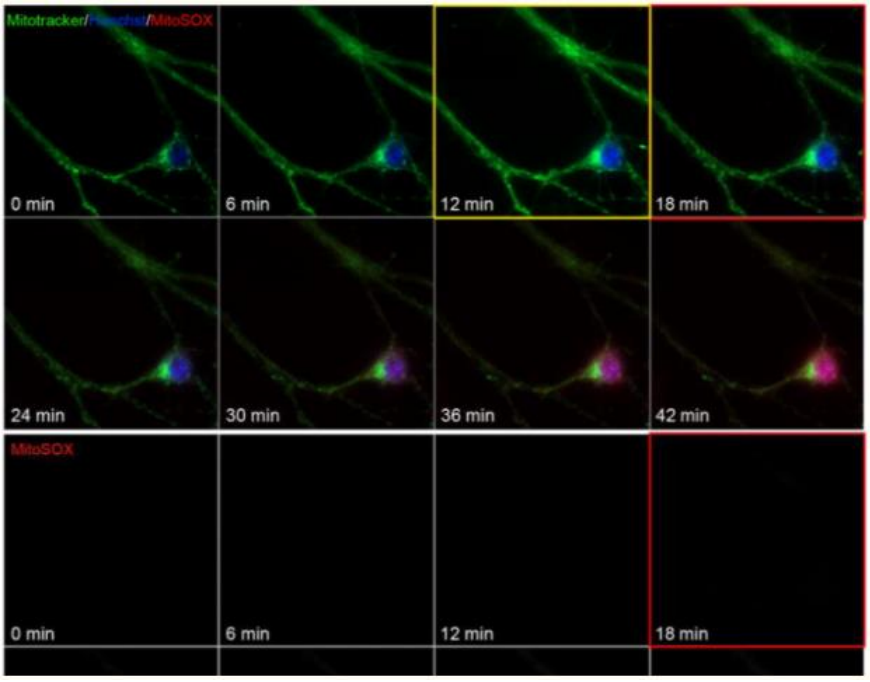


Figure 45: Illustration de la méthode de détection des ROS par imagerie des cellules mitochondriales par utilisation de MitoSOX (Roelofs et al., 2015)

2. Propriétés anti-inflammatoires

2.1 Généralités sur les inflammations

L'organisme est régulièrement exposé à divers agents nocifs, notamment des agents pathogènes (bactéries, virus et champignons) à divers agents physiques et chimiques ainsi qu'aux pollutions environnementales qui conduisent à des lésions cellulaires ou à la mort (O'Byrne, K. J. et Dalgleish, 2001 et O'Byrne *et al.*, 2001). Les cellules du corps résistent et éliminent l'effet de ces agents grâce à un processus inhérent appelé "inflammation".

La réaction inflammatoire représente est une réponse physiologique, rapide et complexe de protection de l'organisme contre une infection, un traumatisme thermique ou mécanique, une ischémie ou un processus néoplasique. Autrement dit, c'est est un mécanisme de défense normal qui protège l'organisme des infections et autres agressions. Il initie l'élimination/destruction des agents pathogènes, les processus de réparation tissulaire et de restauration de l'homéostasie au niveau des sites infectés ou endommagés (Medzhitov, 2008; Du *et al*., 2018). En d'autre terme, l'inflammation peut être définie comme étant une réponse immunitaire compliquée marquée par la libération séquentielle de cytokines pro-inflammatoires (Lin et Tang, 2008). Par conséquent, l'inhibition de la surproduction de médiateurs inflammatoires, en particulier les cytokines pro-inflammatoires, telles que l'interleukine (IL) -1b, l'IL-6 et la nécrose tumorale facteur alpha (TNF-a), pourrait bien prévenir ou supprimer une gamme de maladies inflammatoires (Kim *et al.*, 2003).

L'inflammation est une composante de la réponse immune innée non spécifique. Elle permet à l'organisme de lutter contre les agressions notamment infectieuses, mais peut également devenir délétère lorsqu'elle est excessive et non régulée. Au cours de ce mécanisme de défense, on assiste à la libération massive de cytokines pro-inflammatoire (Hirano et Murakami, 2020). Selon la même publication, dans le cas de l'infection au SARS-CoV-2 responsable de la pandémie mondiale de *coronavirus disease 2019* (COVID-19), ce phenomène de libération massive de cytokines pro-inflammatoire a été bien décrite. Cette inflammation est induite par l'interaction de signaux de stress endogènes (*damage associated molecular patterns* [DAMP]) ou de structures présentes sur les agents pathogènes (*pathogen associated molecular patterns* [PAMP]) avec les récepteurs de reconnaissance de motifs moléculaires, pattern recognition receptors (PRR) tels que les *toll like receptors* (TLR) exprimés

par certaines cellules de l'immunité, principalement les monocytes, macrophages, polynucléaires neutrophiles et cellules dendritiques (Huet *et al.*, 2004).

Quelque soit l'origine de l'inflammation, l'ensemble des modifications tissulaires, vasculaires et humorales successives à des lésions cellulaires ou tissulaires, enregistre 2 phenomènes:

Des phénomènes généraux, qui sont exprimés cliniquement de façon variable, le plus souvent par de la fièvre, et localement par des symptômes de rougeur, chaleur et tuméfaction.

Des phénomènes locaux qui se déroulent dans les tissus vascularisés, préférentiellement dans le tissu conjonctif. L'inflammation vise à éliminer l'agent pathogène et à réparer les lésions tissulaires. Cependant, l'inflammation peut être néfaste par persistance de lésions trop importantes ou de la substance pathogène, ou par anomalies des régulations du processus inflammatoire.

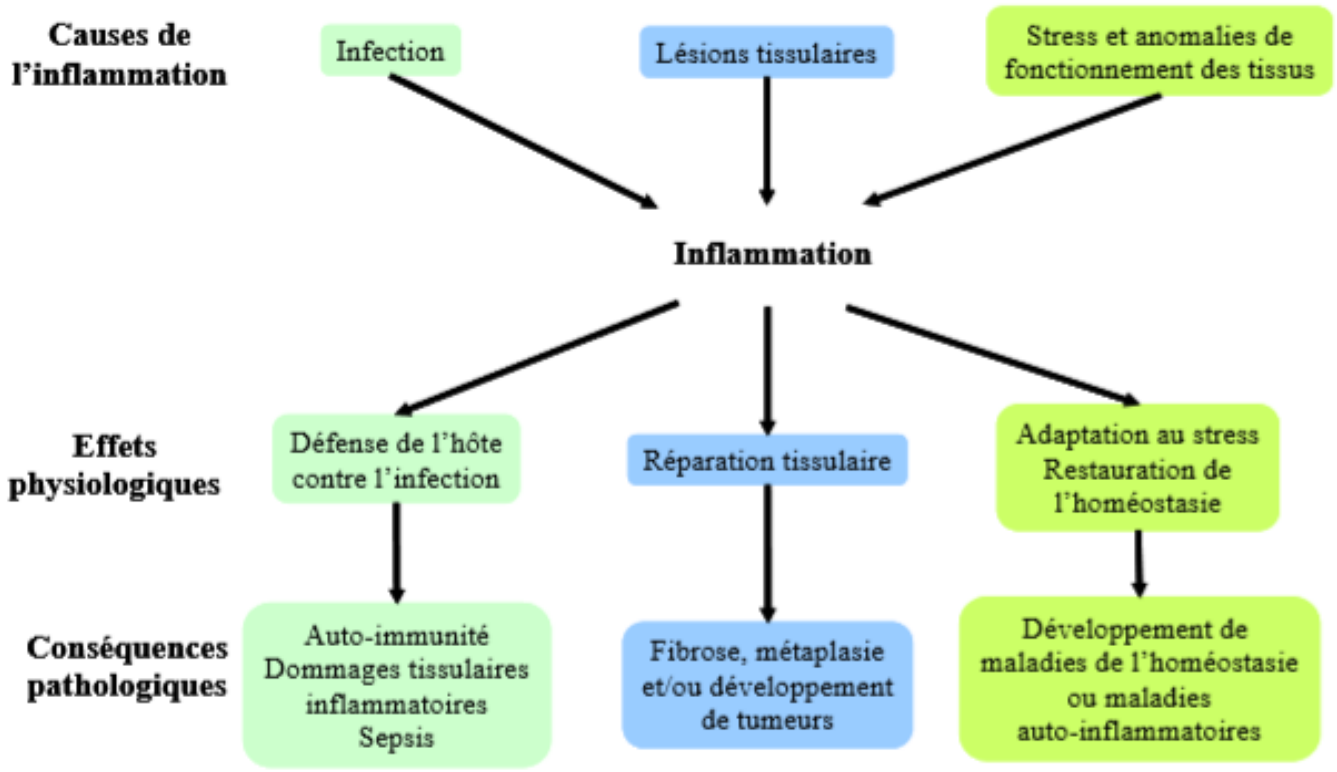


Figure 46: Causes, réponses physiologiques et conséquences pathologiques de l'inflammation (Medzhitov, 2008)

2.2 Médiateurs de l'inflammation

Dans le mécanisme inflammatoire, on retrouve un grand nombre de médiateurs chimiques à toutes les phases de l'inflammation, dans le plasma sous forme de précurseurs qui acquièrent leurs propriétés après activation (généralement par protéolyse). Cela est valable pour les médiateurs d'origine cellulaire préformés et séquestrés dans des granules intra-cellulaires ou synthétisés suite à un stimulus (Blank et Vitte, 2015).

La plupart de ces médiateurs exercent leur action en se fixant aux récepteurs membranaires de cellules cibles. Ils provoquent des réactions en cascade par libération d'autres médiateurs qui peuvent agir eux-mêmes de façon synergique ou antagoniste, conduisant à des mécanismes d'amplification ou de résistance à l'action médiatrice initiale (Male *et al.*, 2007).

a) Cytokines

Les cytokines constituent l'une des protéines les plus importantes et les plus solubles et fortement associées au système immunitaire, y compris la modulation des réactions immunitaires. Elles sont sécrétées par diverses cellules, non immunitaires et immunitaires et sont des indicateurs fondamentaux des fonctions de l'organisme (Masi, *et al*., 2017; Veerman *et al*., 2019; Illescas *et al*., 2020).

Les mécanismes des maladies inflammatoires font intervenir les cytokines principales de d'inflammation qui sont: IL-1, TNF, IL-6 et IL-17. Plus récemment, la tempête cytokinique des formes sévères du COVID-19 a montré que les interactions synergiques des cytokines d'abord décrites *in vitro* se retrouvent renforcées dans le tableau clinique avec atteinte multiple et sévère des organes clés. De nos jours, la liste des cytokines ne cessent de croitre mais il existe 4 principales cytokines de l'inflammation qui sont devenues des cibles thérapeutiques: l'interleukine-1 (IL-1), le Tumor Necrosis Factor (TNF), l'IL-6 et l'IL-17(Miossec, 2020). D'autre part, plusieurs facteurs, infectieux ou non-infectieux peuvent induire la production des cytokines. En réponse à ces facteurs inducteurs, il existe une cascade d'activation de l'inflammation impliquant des cellules différentes. Cette cascade d'activation commence par la synthèse des premières cytokines de la cascade IL-1 et TNF, produites par les monocytes. Ces deux cytokines induisent ensuite la production d'IL-6 par les cellules stromales formant les structures de soutien des tissus. Ces cellules stromales ou mésenchymateuses peuvent être

appelées par exemple les fibroblastes au niveau de la peau, les synoviocytes de la membrane synoviale des articulations, ou simplement les cellules endothéliales. L'IL-6 induit la production par les hépatocytes et la libération dans la circulation de la protéine C réactive (CRP), qui est un marqueur clinique clé de l'inflammation (Slaats *et al.,* 2016).

Les cytokines sont impliquées dans la réparation des lésions tissulaires induites chimiquement, le contrôle de la réplication cellulaire, l'inhibition de la progression du cancer et de l'apoptose, et d'autres rôles physiologiques (Hoffmann *et al.,* 2020; Pazzaglia *et al.,* 2020). En plus, l'interconnexion entre différentes cellules peut être mesurée et la fonction cellulaire peut être surveillée quantitativement à l'aide de sécrétions de cytokines, qui sont d'une valeur significative pour la médecine et la biologie. Les propriétés des cytokines sont très efficaces en raison de leur implication active dans de nombreux processus d'amplification en aval (Rezatabar *et al.,* 2019; Bursch, 2020). Des cytokines inflammatoires comme l'IL-1, IL-6, TNFα, IFNγ et les cytokines sécrétées par les lymphocytes Th17:IL-17 et IL-22, peuvent amplifier et entretenir le mécanisme inflammatoire. Malgré toutes leurs propriétés diverses, seule la faible concentration de cytokines pourrait être suffisante pour induire une réponse cellulaire importante (Adib-Conquy & Cavaillon, 2012; Mao *et al,.* 2018).

Avec l'évolution scientifique, de nombreuses méthodes ont été employées de manière vérifiable pour mesurer et détecter les cytokines comme biomarqueurs précieux dans différentes maladies (Lee *et al*., 2019; Li *et al.,* 2019). Nous pouvons citer par exemple, le Radioimmunoessay (RIA) (Loo *et al.,* 2020), Enzyme-Linked Immunosorbent Assay (ELISA) (Amin *et al.,* 2019), bioassay (Filik *et al.,* 2020), Surface Plasmon Resonance (SPR) (Przybylski *et al.,* 2020) , et d'autres méthodes (Liu *et al.,* 2019) qui sont couramment utilisées dans différents domaines. Malgré la haute précision et la rapidité de ces méthodes analytiques, elles sont limitées par des coûts élevés et le besoin d'un expert expérimenté dans l'utilisation et l'application des différentes techniques. Pour résoudre ces problèmes très sensibles, des biocapteurs ont été développés pour détecter des cytokines spécifiques. Ils fournissent un diagnostic médical rapide et fiable (Baraket *et al*., 2017).

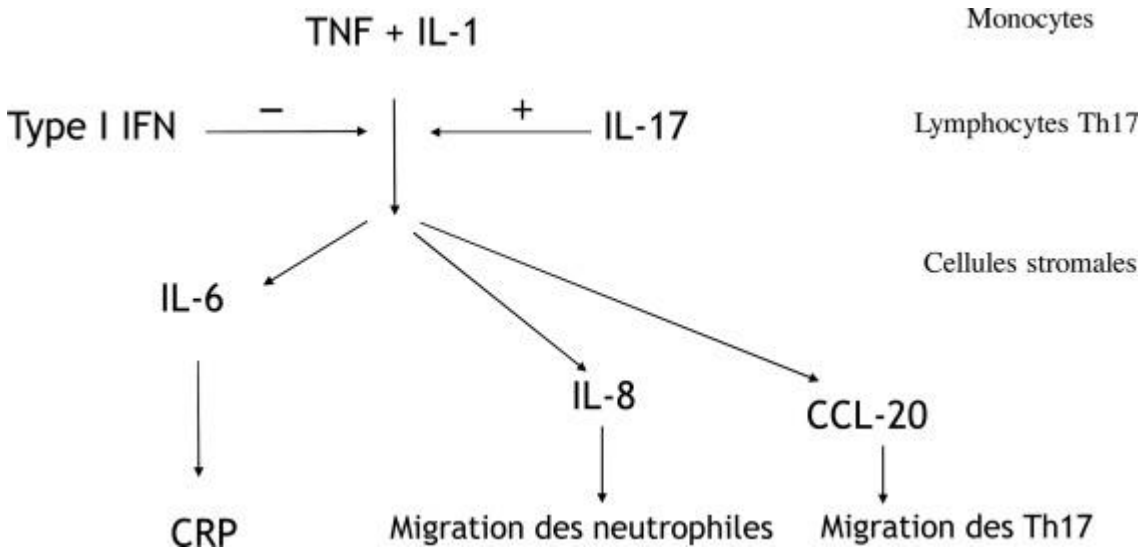


Figure 47: Interactions entre les cytokines de l'inflammation (Miossec, 2020).

Le TNF et l'IL-1 produits par les monocytes, agissent sur des cellules stromales pour induire la production d'IL-6 et d'IL-8. L'IL-6 induit la production de CRP par les hépatocytes. L'IL-8 est un facteur chimiotactique pour les neutrophiles. Ces effets sont amplifiés de façon souvent synergique par l'IL-17 produite par les lymphocytes Th17 et d'autres lymphocytes. CCL-20 représente un facteur chimiotactique pour les lymphocytes Th17. Cette amplification est inhibée par les interférons de type I (Miossec, 2020).

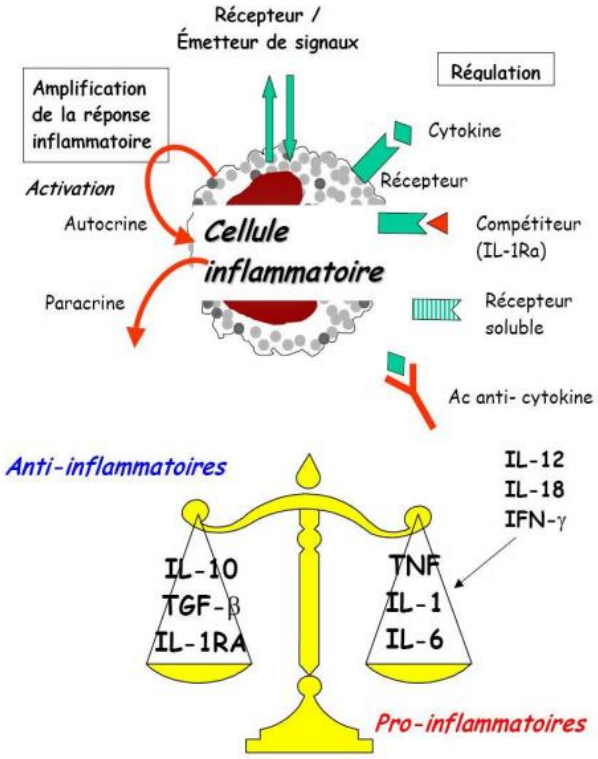


Figure 48: Les cytokines anti et pro-inflammatoires (Danièle, 2012)

b) Oxyde nitrique (NO)

L'oxyde nitrique (NO) est une molécule gazeuse produite par l'endothélium, mais aussi par les macrophages alvéolaires et, d'une manière générale, par les autres cellules du tractus respiratoire. L'enzyme responsable de sa synthèse est la NO synthétase (NOS) dont le substrat est la L-arginine. C'est un médiateur inflammatoire très instable et utile pour explorer d'une manière non invasive les fonctions respiratoires (Pariente, 2004; Choi *et al.*, 2018).

Son effet vasodilatateur pulmonaire permet de l'utiliser en thérapeutiques pour reguler des perturbations des échanges d'oxygène. Il peut inhiber l'adhérence plaquettaire et réguler la perméabilité endothéliale aux lipoproteines (Amin et Abd El-Twab, 2009; Choi *et al.*, 2018). Le monoxyde d'azote (NO) est à la fois un gaz et un messager inter- et intracellulaire ubiquitaire possédant plusieurs fonctions physiologiques. Sa synthèse, fortement augmentée lors de l'inflammation, en a fait un marqueur de la réaction inflammatoire aiguë et/ou chronique (Dinh-Xuan *et al.*, 2015). C'est une molécule de signalisation intervenant dans divers mécanismes physiologiques et physiopathologiques des systèmes

cardiovasculaire, nerveux et immunologique. Il possède des rôles contrastés dans l'organisme vivant. Il est un médiateur biologique, qui contrôle le tonus des vaisseaux sanguins dans les systèmes vasculaires. C'est un agent important dans la défense de l'hôte effecteur au sein du système immunitaire. Cependant, c'est un radical libre de l'oxygène et il a un effet cytotoxique dans les processus pathologiques, en particulier dans les maladies inflammatoires (Alderton *et al.*, 2001; Rao *et al.*, 2016). Dans les mécanismes de défenses de l'organisme contre les micro-organismes, l'activation de la voie de production de l'oxyde nitrique synthase inductible (iNOS), contribue à l'augmentation de la production d'oxyde nitrique (NO). L'inhibition de l'enzyme iNOS (synthase d'oxyde nitrique inductible), peut être bénéfique pour le traitement des pathologies inflammatoires. Dans ce cas, le NO se comporte comme un véritable médiateur pro-inflammatoire. Il pourrait avoir un effet cytotoxique puissant contre les agresseurs (bactéries, les champignons et les virus), participer au recrutement des neutrophiles et relaxer certains muscles (Aktan *et al.*, 2003; Korhonen *et al.*, 2005; Chavant *et al.*, 2020).

Contrairement à l'iNOS, le NOS neuronale et le NOS endothéliale sont des enzymes constitutives, produisant des faibles quantités de NO. Ces 3 isoformes NOS catalysent la réaction de l'oxygène moléculaire avec le substrat d'acide aminé L-arginine pour donner la L-citrulline et le NO (Alkaitis et Crabtree, 2012).

La combinaison d'un stress oxydatif accru et d'une altération de la signalisation du NO suite au découplage du NOS serait impliquée dans la pathogenèse d'un grand nombre d'états pathologiques, notamment l'athérosclérose (Hattori *et al*., 2007; Fougerat *et al*., 2009), l'hypertension (Landmesser *et al*., 2003; Chen *et al*., 2005) et le diabète (Alp *et al.*, 2003).

c) Amines vasoactives

Ce sont des médiateurs formés avant l'inflammation. Elles sont stockées sous la forme de granules cytoplasmiques et sont parmi les premiers médiateurs libérés lors du déclenchement de l'inflammation, dans la phase initiale vasculo-exsudative. Il s'agit de la sérotonine et de l'histamine.

La sérotonine serait synthétisée par des cellules de la muqueuse intestinale appelées cellules d'entérochromaffine. Une fois secretée, elle est conditionnée dans des vésicules intracellulaires puis libérée. La majorité entrant dans la lamina propria et une petite quantité libérée dans la lumière

intestinale (Wu *et al.*, 2019). La review publiée par l'équipe de Shajib en 2015 précise que, la sérotonine est un vasoconstricteur libérée par les plaquettes pendant le processus de coagulation et peu après dans l'intestin, comme une substance qui provoque des contractions des muscles lisses. De nos jours, des preuves scientifiques suggèrent que de nombreuses cellules immunitaires exprimeraient une machinerie pour générer, stocker, répondre et/ou transporter la sérotonine, y compris les cellules T, les macrophages, les mastocytes, les cellules dendritiques et les plaquettes. Il est intéressant de préciser que parmi les principaux tissus de l'organisme, l'absorption de sérotonine est élevée dans la rate, où se trouve un nombre élevé de ces cellules immunitaires (Yadav *et al.*, 2009; Andrews *et al.*, 2015).

En interaction avec ses différents récepteurs, la sérotonine régule divers aspects de la cognition, du comportement et de la physiologie, notamment l'humeur, le sommeil, l'équilibre énergétique, la régénération tissulaire, la coagulation plaquettaire, les fonctions gastro-intestinales ainsi que l'immunité (Baganz et Blakely, 2013). Elle est un médiateur mastocytaire qui serait impliqué dans la fibrogénèse pulmonaire. Elle stimulerait la prolifération de fibroblastes et induirait l'expression du TGFß dans différents types cellulaires *in vitro* (Fabre et Crestani, 2004).

Quand à l'histamine, elle serait un médiateur essentiel de la physiopathologie de multiples maladies allergiques. Elle est synthétisée dans les cellules inflammatoires et immunocompétentes, dans les cellules pariétales de l'estomac et dans les neurones (réserve labile). L'histamine est produite au niveau de la peau, de l'intestin, du foie et des bronches lors de l'altercation antigène–anticorps. Elle peut être produite aussi sous l'effet de médicaments (morphine), des venins, des toxines, des agents endogènes (kinines), des radiations, au moment de brûlures ou de manifestations inflammatoires (Jamet *et al.*, 2006; Raymondjean, 2007).

Les médiateurs sécrétés par les mastocytes de l'intestin telle que l'histamine ou sécrétés par les cellules entérochromaffines comme la sérotonine participent à l'hypersensibilité viscérale des patients souffrant du syndrome du côlon irritable (Cenac *et al.*, 2009). La dégranulation de l'histamine mastocytaire pourrait être déclenchée par des facteurs multiples tels que le choc thermique, le traumatisme, le complexe Ag-Ac (hypersensibilité de type I allergique médiée par les IgE), les fractions du complément (anaphylotoxines), les enzymes lysosomiales des polynucléaires, les cytokines IL1 et IL8. Son action est rapide et fugace, elle peut entraîner l'augmentation précoce de la perméabilité vasculaire lors de la phase aiguë exsudative (vasodilatation artériolaire et contraction des cellules endothéliales

des veinules), la contraction des fibres musculaires lisses (bronchoconstriction) et l'attraction des polynucléaires éosinophiles (Raymondjean, 2007).

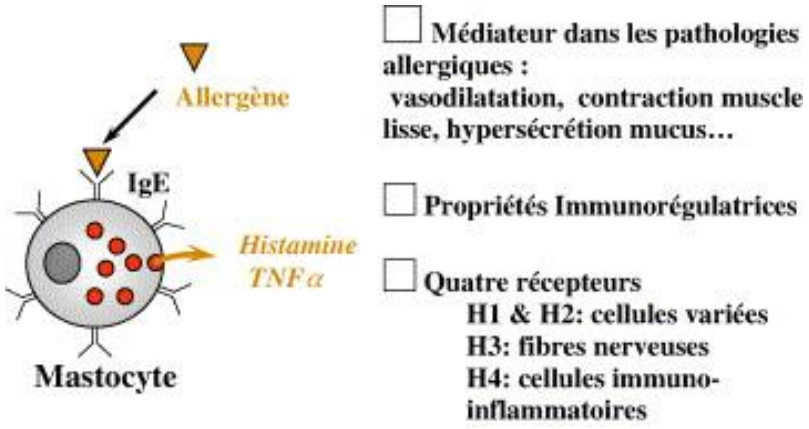


Figure 49: Mécanismes de synthèse des IgE et de la libération de l'histamine (Jamet *et al.*, 2006).

d) Médiateurs lipidiques

Les médiateurs lipidiques proviennent des phospholipides, qui sont les principaux constituants des membranes biologiques (Shimizu, 2009; Wang et Tontonoz, 2019). Ils sont une cible majeure de l'arsenal thérapeutique actuel, la cible la plus connue des anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS) étant la COX. Sous ce terme "médiateurs lipidiques" sont regroupés tous les produits terminaux issus du métabolisme de l'acide arachidonique. Ce sont principalement les PG, les LT et le PAF-acether (Serhan, 2007; Kendall et Nicolaou, 2013). Cette voie métabolique est catalysée par la PLA2 de type IV, qui est une enzyme permettant la libération de l'acide arachidonique à partir des lipides membranaires. Ce sont 2 voies enzymatiques principales qui divergent ensuite pour aboutir, à partir de l'acide arachidonique, à la formation de médiateurs lipidiques de l'inflammation biologiquement actifs: **la voie des cyclo-oxygénases (COX) et celles des lipoxygénases (**Smith *et al.*, 2000). Par la voie de cyclo-oxygénase, il se forme des prostaglandines et des thromboxanes et par la voie de la lipo-oxygénase, on obtient 5HETE et les leucotiènes (principalement LTC4, le LTB4 n'étant pratiquement pas synthétisé par les éosinophiles) (Danièle, 2012).

Les médiateurs lipidiques sont actifs sur un grand nombre de cellules impliquées dans la réponse inflammatoire et sont de puissants facteurs spasmogènes (broncho-constriction) et vasoactifs (vasodilatation, augmentation de la perméabilité vasculaire). Ils favorisent aussi la sécrétion de mucus,

notamment dans l'asthme. Ils sont capables de préactiver les cellules pour les rendre plus sensibles à l'action d'autres médiateurs lorqu'ils agissent comme des facteurs chimiotactiques (Shimizu, 2009).

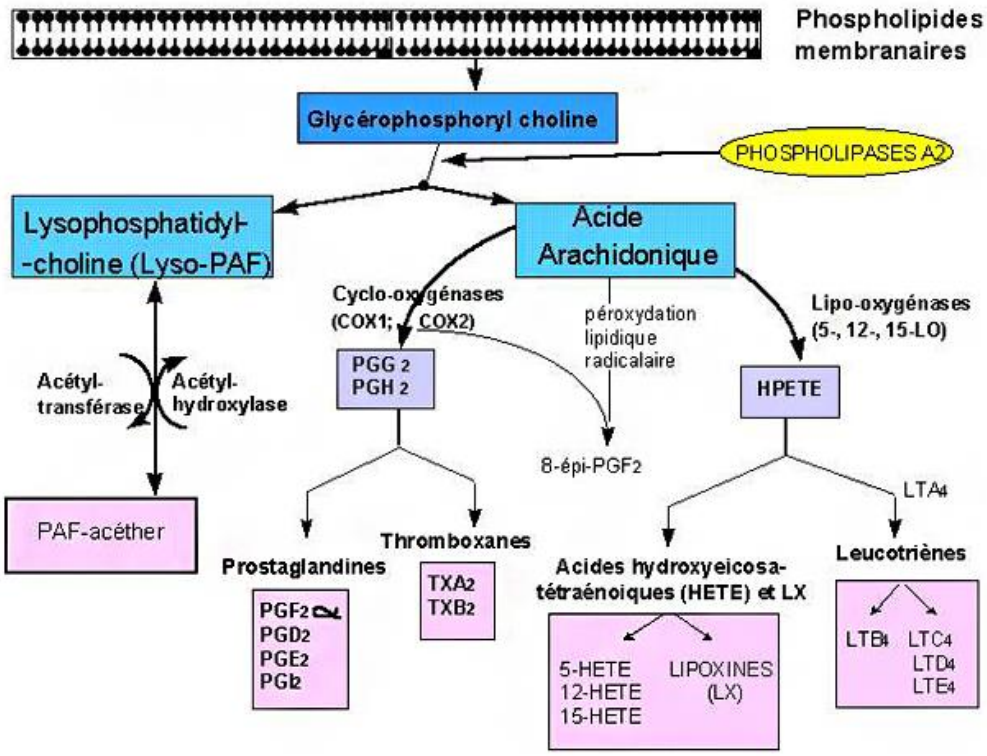


Figure 50: Synthèse des médiateurs lipidiques (Shimizu, 2009; Danièle, 2012)

2.3 Mécanismes de l'inflammation

Au depart, les premières cellules qui apparaissent sur les sites inflammés sont les granulocytes et les monocytes, les macrophages et les lymphocytes apparaissent plus tard. Sur les sites inflamés, les granulocytes, les monocytes et les macrophages sont impliqués dans la destruction des agents pathogènes, dans l'élimination des débris cellulaires et tissulaires, ainsi que dans la réparation des tissus. L'activité de ces cellules serait induite par certains déclencheurs tel que l'endotoxine bactérienne aussi appelé le lipopolysaccharide (LPS). C'est un composant de la paroi cellulaire des bactéries à Gram négatif, qui peut directement activer les monocytes et les macrophages, les incitant à former des cytokines, tels que le facteur de nécrose tumorale α (TNF-α); l'interleukine 1 (IL-1), IL-6 et IL-8; les eicosanoïdes, comme la prostaglandine (PG) E2; l'oxyde nitrique (NO); les métalloprotéinases matricielles (MMP) et autres médiateurs. L'endotoxine induit également l'expression de molécules

d'adhésion à la surface des cellules endothéliales et des leucocytes. Toutes ces cellules précitées, à travers leurs récepteurs PRR particulièrement les TLR (*Tool Like Receptors*) peuvent reconnaitre les différents types d'agresseur ou danger d'origine endogène ou exogène. Les TLR sont présents à la surface de la membrane des macrophages et des cellules dendritiques pré-infiltrés dans le tissu lésé et par les NLR (*Nodlike Receptors ou NACHT-domain and leucine rich repeat containing*) qui sont cytoplasmiques.

Chez des être invertébrés comme les bactéries, il existe des motifs PAMP (*Pathogen Associated Molecular Patterns*) qui seront reconnus par les PRR lorsqu'elles pénètrent dans les tissus. Une fois que les récepteurs sont stimulés, on assiste à l'activation des cellules résidentes qui aboutit à la réaction inflammatoire (Hanada et Yoshimura, 2002; Oppenheim *et al*., 2007; Medzhitov, 2008; Normand, 2009; Medzhitov, 2010; Robinson *et al.*, 2016; Patel *et al.*, 2017).

Selon Yeung *et al.*, (2018), quand la réaction inflammatoire est déclenchée, on assiste à la libération et à la mise en jeux des médiateurs de l'inflammation qui constitue une phase d'alerte pour l'ensemble du système immunitaire agressé. Des médiateurs comme les cytokines inflammatoires modérées pourraient aider l'organisme à éliminer les agents pathogènes envahisseurs, cependant, une fois qu'elle est incontrôlable, l'inflammation se transforme en maladies à long terme ou en blessures aiguës. D'autres médiateurs tels que l'histamine et la sérotonine sécrétée par les mastocytes peuvent agir sur la paroi des vaisseaux sanguins en augmentant ainsi la vasodilatation et la perméabilité des vaisseaux à proximité des zones lésées (Nathan, 2002). Ce qui pourrait bien facilité le passage des polynucléaires (granulocytes et monocytes) du milieu sanguin vers les tissus: c'est la diapédèse. Ainsi, on peut constater les principales caractéristiques de l'inflammation à savoir la rougeur, la douleur, la chaleur et l'œdème caractéristiques principales de la réaction inflammatoire.

Dans la plupart des maladies aiguës ou chroniques, l'inflammation survient souvent au stade initial ou terminal de la maladie et conduit à l'aggravation de la maladie ou à la mort. Un corps sain reste généralement en homéostasie, l'inflammation qui constitue une réaction d'autoprotection se produit lorsque l'homéostasie est rompue (Medzhitov, 2010; Robinson *et al.*, 2016).

Classiquement, la réponse inflammatoire est décrite selon quatre étapes: la reconnaissance des signaux de danger, le recrutement de cellules sur le site d'infection, l'élimination du pathogène et la résolution

de l'inflammation conduisant à un retour à l'homéostasie et à la cicatrisation du tissu lésé. En absence de résolution, s'installe une inflammation chronique (Revue dans Barton, 2008).

2.4 Types d'inflammation

a) Inflammation aigue

D'une manière générale, l'inflammation est une réponse adaptative qui est déclenchée par des stimuli et des conditions nocives, telles qu'une infection et une lésion tissulaire. La réponse inflammatoire aiguë qui est déclenchée par une infection ou une lésion tissulaire implique la distribution coordonnée de composants sanguins (plasma et leucocytes) au site d'infection ou de blessure (Majno et Joris, 2004; Medzhitov, 2010; Kumar *et al*., 2017).

La réponse inflammatoire aiguë est médiée par les macrophages et les mastocytes résidant dans les tissus, aboutissant à la production d'une variété de médiateurs inflammatoires, y compris des chimiokines, des cytokines, des amines vasoactives, des eicosanoïdes et des produits de cascades protéolytiques. Cette réponse inflammatoire est brusque, d'une courte durée dont l'effet principal et le plus immédiat des médiateurs est de provoquer localement un exsudat inflammatoire. Ainsi, les protéines plasmatiques et les leucocytes (principalement les neutrophiles) qui sont normalement limités aux vaisseaux sanguins, accèdent désormais aux tissus extravasculaires du site d'infection (ou blessure). Une fois qu'ils atteignent le site tissulaire, les neutrophiles sont activés, soit par contact direct avec des agents pathogènes, soit par l'action des cytokines sécrétées par les cellules qui résident dans les tissus. C'est ainsi que les neutrophiles tentent d'éliminer ou de tuer les agents envahisseurs en libérant le contenu toxique de leurs granules, qui comprennent les espèces réactives de l'oxygène et les espèces réactives de l'azote (la protéinase 3, la cathepsine G et l'élastase)(Nathan, 2006). Ces effecteurs très puissants ne faisant pas de distinction entre les cibles microbiennes et l'hôte, peuvent provoquer des dommages collatéraux aux tissus de l'hôte. Une inflammation aiguë réussie se traduirait par l'élimination des agents infectieux suivie d'une phase de résolution et de reparation (Serhan, 2007).

b) Inflammation chronique

Une inflammation devient chronique lorsque la cause de l'inflammation persiste ou si certains mécanismes de contrôle chargés d'arrêter le processus échouent. Lorsque ces réponses inflammatoires

deviennent chroniques, il pourrait en résulter une mutation et une prolifération cellulaires, conduisant souvent à la mise en place d'un environnement propice au développement de certaines maladies comme les cancers, les maladies cardiovasculaires, le diabète, l'arthrite, la maladie d'Alzheimer, les maladies pulmonaires et les maladies auto-immunes (Singh *et al.*, 2019). Selon la même source, l'inflammation chronique serait associée par exemple aux différentes étapes impliquées dans la tumorigenèse, y compris la transformation cellulaire, la promotion, la survie, la prolifération, l'invasion, l'angiogenèse et la métastase.

Le rôle des cytokines pro-inflammatoires, des chimiokines, des molécules d'adhésion et des enzymes inflammatoires a été lié à l'inflammation chronique (Aggarwal *et al.*, 2006). Les causes et les mécanismes de cette inflammation chronique étaient peu connus selon les travaux scientifiques publiés par Medzhitov en 2008. Les infections et les blessures ne semblent pas être à l'origine de cet état inflammatoire. Il semblerait être associé au dysfonctionnement des tissus. Un état inflammatoire chronique s'ensuit, impliquant la formation de granulomes et de tissus lymphoïdes tertiaires (Balkwill et Mantovani, 2001).

2.5 Anti-inflammatoires

Un anti-inflammatoire est une molécule ou un médicament destiné à lutter contre une inflammation suite à une aggression (parasitaires, microbiennes, bactérienne) ou une blessure (Newton et Dixit, 2012; Tabas et Glass, 2013; Yatoo *et al*., 2018). Autrement dit, c'est un ensemble de molécules médicamenteuses ou de substances destiné à traiter une réaction inflammatoire et les maladies qui en resultent comme les manifestations rhumatismales, les fractures, les stomatites et les lésions genitals, urinaires, etc (McGEER et McGEER, 2004; Hortelano, 2009; Harirforoosh *et al.*, 2013).

Les anti-inflammatoires se répartissent en anti-inflammatoires stéroïdiens (AIS), anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS) et les anti-inflammtoires naturels. Ce sont des médicaments symptomatiques, qui n'agissent pas sur la cause de l'inflammation (Hortelano, 2009; Dvorakova et Landa, 2017).

Traditionnellement, une inflammation serait traitée avec des anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS) et les corticosteroïdes. Mais il est important de souligner que ces molécules médicamenteuses sont relativement anciennes et possèdent de multiples effets secondaires graves avec une efficacité

limitée. C'est pourquoi de nos jours, il existe une demande accrue de nouveaux agents anti-inflammatoires (Dvorakova et Landa, 2017).

a) AINS (Anti-inflammatoires non stéroïdiens)

Les anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS) représentent une classe thérapeutique très utilisée en raison de leurs multiples activités biologiques (antipyrétiques, antalgiques et anti-inflammatoires). Ils peuvent être utilisés dans de nombreuses indications comme dans les douleurs ostéomusculaires, les affections rhumatologiques, en traumatologie, dans les coliques néphrétiques, etc. Ce sont des médicaments destinés à prévenir ou à contenir les manifestations inflammatoires. Leur action est uniquement symptomatique en agissant sur la physiopathologie de l'inflammation, sans agir sur son étiologie qu'il faudrait traitée à part (Dvorakova et Landa, 2017).

Les AINS sont de puissants inhibiteurs des cyclooxygénases COX-1 et COX-2. D'une part l'inhibition du cyclooxygénase COX-1 par les AINS est la cause de leurs effets secondaires (lésions du tractus gastro-intestinal). D'autre part, la COX-2 est induite au moment de l'inflammation et provoque la production sur place des prostaglandines pro-inflammatoires (PGE_2, PGD_2). D'où la nécessité de trouver des inhibiteurs sélectifs de COX-2. C'est pourquoi, plusieurs scientifiques ont oeuvré pour développer des stratégies allant vers de nouveaux composés anti-inflammatoires ayant des propriétés sélectives de la COX-2. Ces inhibiteurs sélectifs, nommés coxibs ont amélioré l'efficacité des AINS et diminué leurs dommages au tractus gastro-intestinal. Par contre, ces inhibiteurs aurait augmenté le risque de cardiotoxicité et d'hépatotoxicité (Bannwarth, 2000; Badri *et al.*, 2016).

Outre les inhibiteurs de la COX, il y avait un nombre relativement faible de cibles pour produire des médicaments anti-inflammatoires efficaces, tels que le récepteur H1 de l'histamine, la cytokine TNFα, le récepteur des cystéinyl leucotriènes. Au cours des deux dernières décennies, il y a eu une augmentation significative des connaissances sur l'immunologie, et ainsi de nombreuses cibles anti-inflammatoires supplémentaires ont été décrites par les chercheurs.

Malgré ces progrès, il n'existe encore qu'un nombre limité de médicaments anti-inflammatoires approuvés, mais de nouveaux progrès sont attendus (Dinarello, 2010; Dvorakova et Landa, 2017).

Actuellement sur le marché pharmaceutique, les AINS les plus courantes sont entre autres les molécules suivantes: le diclofénac, l'ibuprofène, l'aspirine et l'indométacine (Erdogan *et al*., 2019; Hassan *et al*., 2019; Katsinelos *et al*., 2019). Tous ces AINS ont un mode d'action basé en grande partie sur l'inhibition compétitive, réversible ou non, de la COX1 et/ou COX2 qui peuvent produire de la prostaglandine à partir de l'acide arachidonique (Grandin, 2013; Katsinelos *et al.*, 2019). Dans une ancienne publication de Furet *et al*., (1987) intitulé *''Hepatitis due to nonsteroidal anti-inflammatory agents''* il a été rapporté que les AINS suivants: l'ibuprofène, le pirprofène et le naproxène seraient impliqués dans des hépatites de divers types. C'est pourquoi, ces auteurs ont fortement recommandé la surveillance des concentrations sériques d'enzymes hépatiques chez les patients recevant un anti-inflammatoire non stéroïdien pendant un traitement de longue durée. Actuellement, plusieurs médicaments déjà approuvés par la *Food and Drug Administration* (FDA) ont dû être retirés du marché.

b) AIS (Anti-inflammatoires stéroïdiens)

Les anti-inflammatoires stéroïdiens (AIS) représentent des dérivés des hormones naturelles, les stéroïdes de la corticosurrénale. Ils sont aussi appelés glucocorticoïdes ou simplement les corticoïdes. Ils se distinguent par un pouvoir anti-inflammatoire plus marqué (Cohen et Jacquot, 2008; Coutinho et Chapman, 2011).

Ils peuvent être administrés par voie générale telles que la cortisone, l'hydrocortisone, la triamcinolone, la dexaméthasone, la bêtaméthasone et seulement en application locale, telles que la fludrocortisone et la fluocinolone qui provoquent une forte rétention sodée (Bourbon *et al.*, 2004; Cohen et Jacquot, 2008; Becker, 2013; Danielson *et al*., 2018).

La pénétration cutanée de ces anti-inflammatoires et leur activité font qu'ils peuvent être responsables d'effets indésirables. Il convient de mieux connaître les critères de choix de la molécule anti-inflammatoire stéroïdien, ses indications, ses contre-indications, son niveau d'activité, la qualité de son excipient et d'un éventuel additive (TRANSDISCIPLINAIRES, 2008; Mebirouk, 2017).

et la forme galénique la mieux adaptée parmi les nombreux produits commercialisés et leurs règles d'application (Capet *et al.*, 2001; TRANSDISCIPLINAIRES, 2008; Mebirouk, 2017).

Dans leur mécanisme d'action, les corticoïdes traversent la membrane cytoplasmique par diffusion simple et se lient à un récepteur spécifique pour former un complexe qui va traverser la membrane nucléaire. Par interaction avec un site receveur nucléaire chromatinien, le complexe va agir sur l'ADN, modifier l'expression de gènes et induire une modification de la transcription. C'est ainsi qu'ils agissent sur des gènes intervenant sur la prolifération, d'où leur action antiproliférative, et sur des gènes intervenant sur la synthèse de cytokines (interleukine 1 [IL1], tumour necrosis factor D [TNF-D]), ce qui explique leur action immunosuppressive. Ils inhibent également la libération d'acide arachidonique, précurseur de nombreuses molécules impliquées dans l'inflammation (leucotriènes)(TRANSDISCIPLINAIRES, 2008; Roquilly et Asehnoune, 2019). Globalement, les glucocorticoïdes antagonisent les processus inflammatoires, inhibent l'effet des agresseurs du tissu mésenchymateux, empêchent l'activation de la phospholipase A_2 qui libère l'arachidonique des phospholipides de la membrane cellulaire. Par ailleurs, ils induisent la synthèse d'une protéine, la lipocortine, qui s'oppose à l'interaction de l'enzyme avec ces phospholipids (Cohen et Jacquot, 2008).

c) AIN (Anti-inflammatoires naturels)

De nos jours, le traitement de l'inflammation suite au processus inflammatoire se concentre principalement sur les anti-inflammatoires stéroïdiens et non stéroïdiens. Les anti-inflammatoires naturels (AIN) sont moins utilisés surtout dans les pays développés. Cependant, les effets secondaires, tels que l'hypertension, l'ostéoporose, l'immunosuppression (Ma *et al*., 2016) et la gastrite hémorragique, l'ulcère digestif supérieur, l'hépatotoxicité, les allergies de ce dernier, une limitation importante à l'utilisation de ces médicaments (Yu *et al.*, 2015; Hou *et al*., 2020). D'où la stratégie thérapeutique orientée vers les sources naturelles de molécules anti-inflammatoires. Depuis l'antiquité, les inflammations et les troubles pathologiques associés ont été traités avec des plantes ou des formulations d'origine végétale (Hou *et al.*, 2020).

Les polysaccharides extraits de sources naturelles ont attiré une attention considérable ces dernières années en raison de leur sécurité, de leur accessibilité et de leurs puissantes activités anti-inflammatoires et immunomodulatrices (Guo *et al.*, 2018). En 2016, l'équipe de Wu a identifié un polysaccharide sulfaté extrait de l'algue brune *Sargassum cristaefolium* qui pouvait présenter des effets anti-inflammatoires dans les cellules RAW264.7 stimulées par des lipopolysaccharides (LPS).

Plusieurs études phytochimiques ont demontré que les fruits, les légumes et les légumineuses alimentaires contiendraient des niveaux élevés de composés phytochimiques qui montrent un effet anti-inflammatoire, mais leurs mécanismes d'action n'ont pas été complètement identifié. Leurs composés phénoliques et triterpénoïdes ont montré une activité anti-inflammatoire plus élevée que les autres composés (Naim *et al*., 2015). Dans les légumineuses alimentaires, les lectines et les peptides ont démontré une activité anti-inflammatoire remarquable tout comme les cytokines spécifiques libérées dans diverses agroressources. Ils peuvent être incorporés dans de nouvelles formulations anti-inflammatoires bioactives de divers nutraceutiques et produits pharmaceutiques (Zhu et Xu, 2018).

Dans la recherche de MPharm réalisée en 2012 portant sur les extraits aqueux des peaux immatures et matures de *Musa sapientum*, il a été prouvé que ces matrices présentaient une puissante activité inhibitrice de NO. Cependant, les extraits possédaient une faible teneur en composés phénoliques totaux avec une faible activité antioxydante. Selon la même étude, ces résultats de recherches étayent la médecine traditionnelle thaïlandaise qui utilise les pelures de banane pour le traitement de maladies liées à l'inflammation.

Les extraits de tige de la banane Mauli (*Musa acuminata*) à travers leur contenu en polyphénol a montré des propriétés anti- effets inflammatoires via le mécanisme inhibiteur du signal du facteur de nécrose tumorale α (TNF-α) et du facteur nucléaire kappa (NF-κB) (Apriasari *et al.*, 2020). En 2016, Yuei et collaborateurs avaient également demontré que les extraits éthanoliques des peaux de banane cavendish avaient des effets anti-inflammatoires puissants.

En somme, il est important de mentionner que les plantes médicinales sont également des sources prometteuses pour la préparation de nouveaux medicaments pouvant être utiles dans la resolution des pathologies anti-inflammatoires (Chien *et al.*, 2016; Kazemi *et al.*, 2018).

Deuxième partie: Matériel et Méthodes

1. Préparation de l'extrait sec de banane cavendish et plantain de Guinée

10- 1.1 Récolte des biomasses et préparation des échantillons

Les bananes et les plantains ont été récoltés dans le champ du Centre de Recherche Agronomique de Kindia (CRAK) en République de Guinée (voir la figure 50). Ils ont été récoltés à l'état vert au bout de 3 mois de cycle végétatif. Après la récolte, ils ont été emballés dans des cartons préparés et expédiés à Montpellier en 24h. A l'arrivée, ils ont été mis sous congélation à -20°C au laboratoire de pharmacologie de la faculté de pharmacie de l'Université de Montpellier. Après 2 mois, les bananes et les plantains ont été épluchés, pesés et séparés en des lots de pulpe et de pelure. Au terme de ce traitement, les échantillons ont été conduits au laboratoire de Phytothérapie et d'Aromathérapie de l'UMR Qualisud pour l'extraction des extraits bruts. Ce laboratoire développe un procédé d'extraction permettant d'obtenir des extraits secs de banane en évitant au maximum les facteurs de dégradation.

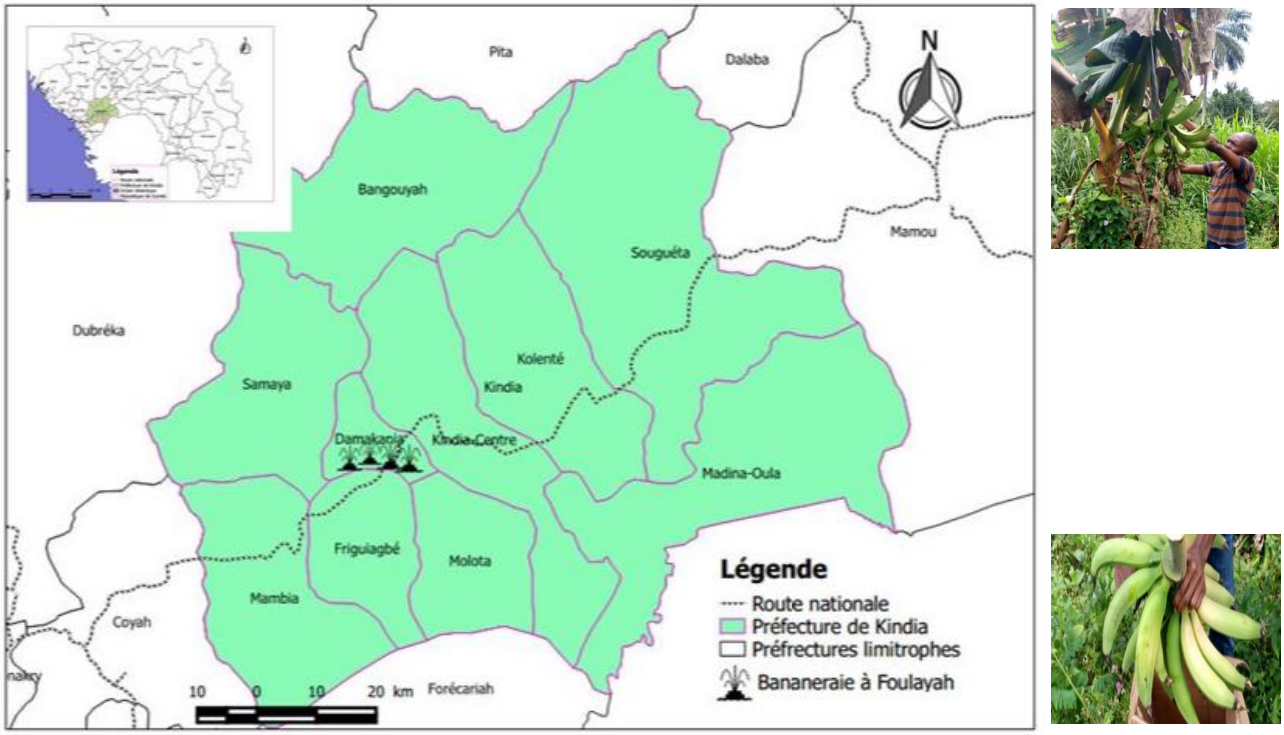


Figure 51: Récolte des biomasses et préparation des échantillons

a) **Lyophilisation:** elle consiste à débarrasser la matrice végétale de sa teneur en eau par sublimation sans modifier ses nutriments. Avant sa mise en pratique, les peaux et les pulpes sont toujours congélées à -20°C. Elles ont été découpées à la main en petits fragments pour faciliter

le processus de lyophilisation. Le lyophilisateur utilisé possède 4 pots accrochés au dessus de l'appareil. Ces pots sont branchés après avoir allumé l'appareil et la pompe à vide. Il est maintenu à la température de -104°C. Au fur et à mesure que le processus avance dans le temps, le lyophilisateur est régulièrement nettoyé pour le maintenir efficace et efficient. La lyophilisation des matrices est contrôlée en touchant les pots ou en touchant directement la matrice à lyophiliser dans la main après avoir rétiré les pots. Pour faire le nettoyage, on chauffe de l'eau à 100°C qui sera mise sur le glaçon. Ainsi, on retire doucement de la pompe les pots contenant les peaux/pulpes, on remet l'air et on ouvre la molette de la pompe pour évacuer l'eau. Pendant le nettoyage du lyophilisateur, il est conseillé de ne jamais mettre la main dans le glaçon issu de la sublimation des peaux/pulpes de banane. Après le nettoyage, l'appareil est relancé pour le jour suivant. Les peaux/pulpes sont séchées durant 3 à 4 jours en fonction de la nature de la matrice. Il est également conseillé d'écarter les bananes trop mûres. Elles peuvent se caraméliser, retarder le processus et ne permettent pas d'avoir une bonne farine de banane au mixage. Il serait alors idéal de choisir des bananes à l'état vert.




Figure 52: Lyophilisation des pelures et de pulpes à gauche et pulpes caramélisées à droite

b) Broyage: après séchage, les matrices sont pesées pour connaitre le poids sec puis mises dans un mixeur pour être broyées et tamisées à l'aide d'un tamis de 0,8mm de diamètre. La poudre blanche ou blanchâtre (pulpe ou peau) obtenue est pesée et mise en bouteille bien parafilmée pour être congelée avant délipidation ou être directement délipidée. Cette phase facilite préalablement la délipidation en donnant de fines particules.




Figure 53: Pesée et broyage des bananes lyophilisées

c) Délipidation: elle est réalisée dans un appareil de Soxhlet de la manière suivante:

- Prélever 100g de poudre de matrice de banane et mettre dans la cartouche, couvrir la poudre de banane par du coton de verre et des billes;

- Mettre 2,7 litres d'hexane dans un ballon de 5000 ml;

- Monter le verre contenant la cartouche au dessus de ce ballon;

- Un refrigérant est adapté au dessus du verre. Il condense la vapeur d'hexane (solvant) avant que ce dernier ne retombe dans la cartouche;

- Lancer la délipidation pour 24h d'extraction;

Pendant le processus d'extraction, les lipides sont progressivement extraits et le solvant utilisé (hexane) vire de la couleur transparente au jaune. Au bout de 24h, on attend la fin d'un cycle d'extraction (retombée de l'hexane dans le ballon) puis on éteint pour éviter le retour du solvant sur le produit délipidé dans la cartouche. On laisse l'appareil réfroidir et l'hexane contenant les lipides est recueilli sous la hotte pour être recyclé au rotavapor. Le produit délipidé (peaux ou pulpes) sera séché et pesé dans un erlenmeyer préalablement taré. Enfin, la matrice délipidée est soit conservée en congelateur à -20° C ou soit directement soumise à la macération.

Le recyclage permet de récupérer en moyenne 1litre de solvant (hexane) par recyclage au rotavapor. Ce solvant recyclé est utilisable pour une nouvelle délipidation.

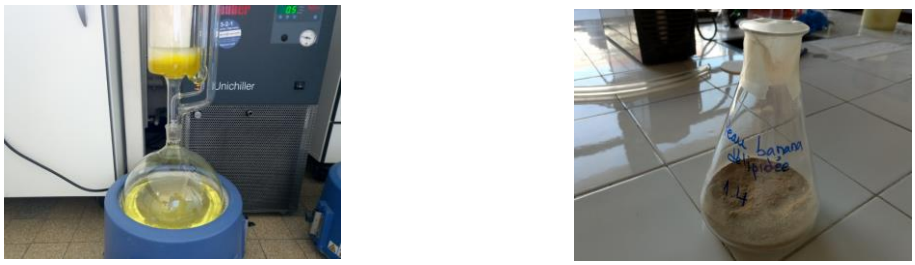


Figure 54: Délipidation au Soxhelet et pelure de banane délipidée

d) Macération de la poudre délipidée: cette étape permet d'obtenir l'extrait liquide de la matrice de banane ou de plantain. Elle se réalise comme suit:

- une solution mixte de solvant est préparée et est constituée de 400 ml d'éthanol absolu, 95 ml d'eau distillée et 5 ml d'acide acétique normal.

- la poudre de banane (peau ou pulpe) de couleur blanche ou blanchâtre (dans l'erlenmeyer) est mise en suspension dans 500 ml de ce mélange de solvant;

- la suspension (ainsi dans l'erlenmeyer) est maintenue en agitation grâce à un barreau aimanté (elle prend la couleur noire pour la peau et blanchâtre pour la pulpe). Cette suspension est soumise à une agitation modérée durant 24h pour une 1ère macération. Au terme de ce temps, la macération est arrêtée et la suspension reste au repos pour 10 à 15min. Enfin, le surnageant (jaunâtre pour la pulpe et noirâtre pour la peau) est recueilli dans des pots de centrifugation et la pâte de macération est mise à nouveau en suspension dans 500 ml dans le mélange de solvant préalablement préparé pour une deuxième macération de 24h. Les 2 phases hydroalcooliques seront ensuite traitées et remises dans le même lot. Malgré les temps longs d'extraction et l'utilisation d'une quantité élevée de solvants, cette méthode est relativement peu coûteuse car non consommatrice d'énergie. De plus, elle se déroule à température ambiante ce qui est très positif pour conserver l'intégrité des molécules polyphénoliques qui sont sensibles aux changements de température.



Figure 55: Macération sous la hotte

e) Centrifigation: avant de centrifuger le surnageant, il est reparti et pesé dans des pots 2 à 2 à des poids identiques. Ensuite, ces pots contenant le surnageant sont placés dans la centrifugeuse qui sera bien fermée et soumise à une rotation de 3500 rpm pendant 15 min. Elle permettra d'obtenir un surnageant bien décanté qui sera filtré tout de même.



Figure 56: Centrifugeuse

e) **Filtration du surnageant:** il est filtré à l'aide d'une pompe à vide connectée à une fiole à vide. Dans la fiole, il est introduit un joint pour assurer l'étanchéité du vide. Au dessus du joint, il est monté un entonnoir Buchner dans lequel est placé un filtre rouge sans cendre. Le surnageant est progressivement versé au milieu de l'entonnoir Buchner et recueilli dans la fiole à vide à travers le filtre. Cette démarche permet d'obtenir l'extrait liquide limpide hydroalcoolique.



Figure 57: Filtration à l'aide d'une pompe à vide

g) **Evaporation de l'éthanol des extraits hydroalcooliques:** le filtrat obtenu est soumis à une évaporation qui peut durer de plus d'une heure. La durée de cette étape dépendra de la quantité de filtrat. Au cours de l'évaporation, la pression du rotavapor peut être régulée de 60 à 80 mbar. Elle permet de débarrasser l'extrait de l'éthanol qui est non recyclable.

L'extrait aqueux ainsi obtenu est mis dans un petit ballon préalablement taré. Il est congelé avant lyophilisation pour avoir l'extrait sec de banane ou de plantain.

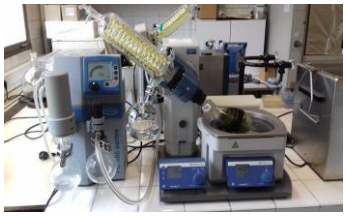


Figure 58: Elimination de l'éthanol des extraits hydroalcooliques

h) **Lyophilisation de l'extrait aqueux:** elle se réalise de la même façon que celle de la peau/pulpe fraiche. Les extraits dans des petits ballons sont mis au lyophilisateur durant 2 à 3 jours selon la teneur d'eau dans l'extrait et la nature de l'extrait. Au terme de ce temps, on obtient **l'extrait**

sec. Il est pesé, mis dans une boîte bien étiquetée et conservé sous congélation avant son utilisation pour des études physico-chimiques et tests d'activités biologiques.





Figure 59: Lyophilisation des extraits hydroalcooliques et extraits secs conditionnés

Le diagramme resumant l'extraction se présente comme suit:



Figure 60: Diagramme d'extraction des extraits bruts

Au total 4 extraits de peau et de pulpe de banane cavendish et de plantain de Guinée ont été préparés pour réaliser des analyses physico-chimiques et des tests biologiques.

1.2 Dosage des polyphénols totaux (TPC) par la méthode de Folin-Ciocalteu

A l'entame de l'expérimentation, il a été préparé 1 ml de carbonate de sodium (Na_2CO_3) dans 10 ml d'eau distillée. Les extraits secs de peau et de pulpe ont été pesés et dilués dans le DMSO (diméthylsulfoxyde), à 1mg/ml et passés aux utrasons pendant 5 min pour faciliter sa solubilisation. A partir de cette solution, une solution de 0,5 mg/ml a été préparée. L'eau distillée et les extraits de pulpe et de peau sans être mélangés avec le réactif de 10% Folin-Ciocalteu ont été considérés comme blanc au cours de l'expérimentation. L'acide gallique a servi de gamme d'étalonnage à des dilutions de 1,56; 3,125; 6,25; 12,5; 25; 50 et 75 µg/ml. Il a été préparé extemporanement 1 ml de solution commerciale de 10% Folin-Ciocalteu dans 9 ml d'eau distillée. Enfin, les différentes solutions constituées ont été distribuées dans une plaque à 96 puits en triplicate comme suit: 50 µl d'extraits de peau et de pulpe, 50 µl d'eau distillée, 50 µl de Folin-Ciocalteu à 10% et 50 µl de carbonate de sodium (Na_2CO_3). Le temps d'incubation a été de 60 min à température ambiante, la plaque étant protégée dans du papier aluminium afin d'éviter l'effet de la lumière sur le Folin-Ciocalteu. La lecture de la plaque a été réalisée par un spectromètre (MDS Inc., Toronto, Canada) et l'absorbance a été mesurée à 650 nm. Les résultats représentent la moyenne ± SEM de 3 expériences indépendantes réalisées (soit 3 puits/concentration pour chaque expérience) et sont exprimés en milligramme équivalent acide gallique par gramme de banane ou de plantain frais (µg GAE/mg dw) et (µg GAE/g fw).

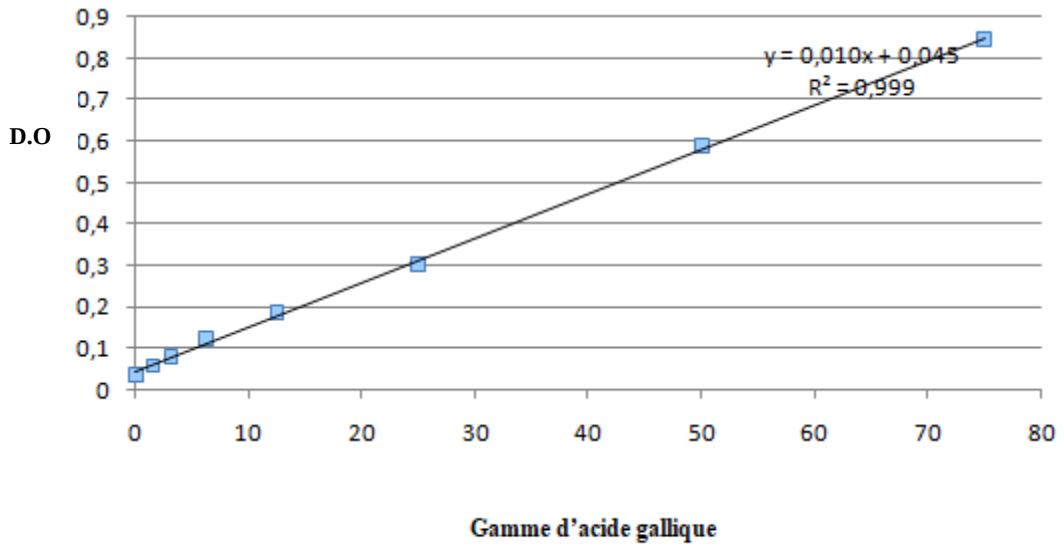


Figure 61: Droite d'étalonnage TPC

1.3 Caractérisation du pouvoir antioxydant des extraits de banane cavendish et plantain in vitro

Au regard de la complexité du mécanisme d'oxydation et les propriétés multiples des antioxydants, avec des composants à la fois hydrophiles et hydrophobes, il n'y a pas une méthode universelle par laquelle l'activité antioxydante peut être mesurée quantitativement de manière bien précise (Cao et Prior, 1998). Il existe plusieurs méthodes de test antiradicalaire et aucune de ces méthodes à elle seule n'est suffisante pour caractériser l'oxydation ou la protection contre l'oxydation, mais chacune contribue à la caractérisation globale des activités biologiques des composés ou mélanges testés. D'où la nécessité de combiner les réponses de tests différents et complémentaires pour avoir une idée plus ou moins précise sur la capacité antioxydante de l'échantillon à tester. Globalement, l'ensemble des méthodes utilisées pour évaluer le pouvoir antioxydant *in vitro* peuvent être divisées en 2 groupes:

Les méthodes basées sur le transfert d'un atome d'hydrogène ou *Hydrogen Atom Transfert* (HAT) comme: la méthode ORAC (*Oxygen Radical Absorbance Capacity*), TRAP (*Total Reactive Antioxidant Potential*), etc. La plupart de ces méthodes sont dépendantes du solvant utilisé et du pH, tandis que la présence de métaux peut interférer avec ces méthodes (Prior *et al.*, 2005; Shahidi & Zhong, 2015).

Les méthodes basées sur le transfert d'un électron ou *Single Electron Transfert* (SET) notamment:

TEAC (*Trolox Equivalent Antioxidant Capacity*);

FRAP (*Ferric Reducing Antioxidant Power*);

DPPH (2,2-Diphenyl-1-Picrylhydrazil) (considéré aussi comme méthode HAT, donc mixte) (Shahidi & Zhong, 2015).

Dans notre cas, nous avons utilisé le DPPH pour la méthode SET et l'ORAC pour la méthode HAT. Ces 2 méthodes sont simples à réaliser, rapides et moins couteuses que TEAC et FRAP, d'où ce choix pour réaliser nos tests antioxydants *in vitro.*

En plus de ces 2 méthodes, nous avons également utilisé la méthode de Mitotracker pour illustrer l'effet antioxydante sur les espèces réactives de l'oxygène (ROS), notamment les superoxydes par imagerie.

a) Méthode DPPH

Le DPPH est un moyen de test antiradicalaire utilisé par plusieurs chercheurs (Amri *et al.*, 2018), utilisé ici selon la méthode décrite par Morel *et al*., (2018). Les extraits secs de peau et de pulpe ont été pesés et dissous dans le DMSO, à 1mg/ml. Cette solution a été passée aux ultrasons pendant 5 min pour faciliter sa solubilisation, puis dilué au ½ dans l'éthanol absolu. L'éthanol et les extraits (pulpe et peau) sans DPPH ont été utilisés comme blanc. Le trolox a servi de gamme d'étalonnage à des concentrations de 12.5, 25, 50 et 75 µM. L'extrait éthanolique de romarin (soit 0,2 mg d'extrait éthanolique de romarin dilué dans 1 ml d'éthanol) et l'acide chlorogénique à 0,01 mg/ml d'éthanol, ont été utilisés comme témoins positifs. Dans une plaque à 96 puits, 100 µl de la gamme, de l'acide chlorogénique, du romarin et des extraits de peau et de pulpe ont été distribués pour les différentes concentrations à tester. Enfin, 75 µl d'éthanol absolu et 25 µl de la solution de DPPH (soit 2 mg dans 5 ml d'éthanol) préparés extemporanément ont été également ajoutés afin de déclencher la réaction et porter le volume final à 200 µl. A préciser que le DPPH avait été agité pendant 1h à l'obscurité et filtré à l'aide d'un filtre nylon 0.45µm, hydrophobe, de diamètre 25mm. Chaque solution a été distribuée 3 fois dans les puits selon le plan de plaque. La plaque a été protégée contre la lumière par du papier aluminium et incubée pendant 30 min à température ambiante. L'absorbance a été mesurée à 550 nm en utilisant un lecteur de microplaque. Les résultats représentent la moyenne±SEM de 3 expériences indépendantes réalisées et sont exprimés en micromoles d'équivalent Trolox par gramme d'extrait sec (µmol TE/g MS).

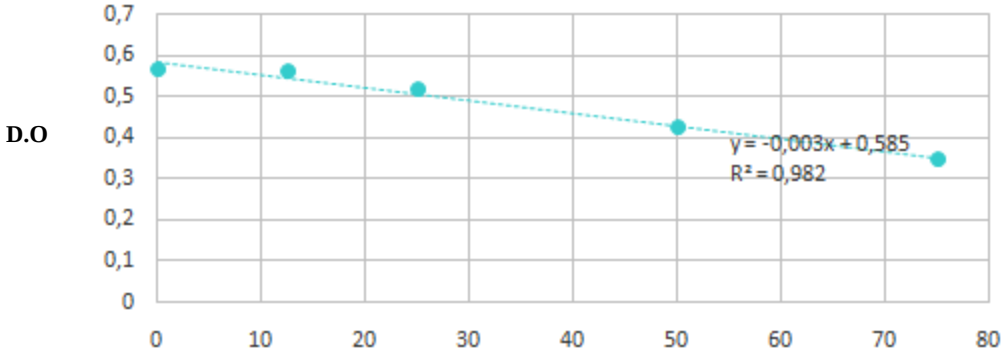


Figure 62: Droite d'étalonnage de la méthode DPPH

b) Méthode ORAC

Le dosage ORAC a été réalisé suivant la méthode décrite par Morel *et al.,* (2018). Les extraits ont été solubilisés dans le DMSO (diméthylsulfoxyde) à 1 mg/ml. De cette solution mère, il a été préparé une solution à 50µg/ml dans une solution de tampon phosphate à 75 mM avec un pH = 7,4. Le trolox utilisé pour la gamme d'étalonnage a été dilué à 6,25; 12,5; 25; 50 et 75 µM. L'acide chlorogénique (8,8 µM) et l'extrait éthanolique du romarin (12,5 µg/ml) ont servi de témoin positif. Dans une plaque opaque de 96 puits, il a été distribué 20 µl de la gamme trolox aux différentes concentrations précitées tout comme l'acide chlorogénique (8,8 µM), l'extrait éthanolique du romarin (12,5 µg/ml) et les extraits de peau et de pulpe à 50 µg/ml. Egalement, il a été rajouté 100 µl de tampon phosphate et 100 µl de solution de fluorescéine fraîchement préparés à 0,1 µM dans le tampon phosphate préparé à cet effet. Toutes ces solutions ont été déposées dans la plaque opaque en triplicate. Après cette phase, la plaque a été incubée à 37°C pendant 10 min sous agitation. La réaction a été déclenchée par l'ajout de 50 µl de l'AAPH (2,2'-Azobis (2-amidinopropane) dihydrochloride) préparée extemporanément. La fluorescence a ensuite été mesurée et enregistrée à la longueur d'onde d'excitation de 485 nm et une longueur d'onde d'émission de 535 nm, toutes les 5 min durant 70 min en utilisant un lecteur de microplaques multimode TriStar LB 941 (Berthold Technologies, Bad Wildbad, Allemagne). Les valeurs d'ORAC finales ont été calculées en utilisant une équation de régression entre la concentration de Trolox et l'aire sous la courbe de décroissance de la fluorescéine. Elles ont été exprimées en micromoles de trolox équivalent par gramme de matière sèche (µmol TE/g MS). Les résultats sont la moyenne ± l'écart type de 3 expériences indépendantes, soit 3 puits / concentration pour chaque expérience.

c) Méthode de Mitotracker (marquage mitochondrial)

Il est important de rappeler que les mitochondries constituent le principal centre d'accumulation des espèces réactives de l'oxygène (ROS) dans ses compartiments. Les ROS en particulier le superoxyde se retrouvent dans les compartiments intracellulaires. A ce niveau, le phenomène redox dans les mitochondries reflète l'activité métabolique mitochondriale et la forme physique globale de cet organite. A la suite des réactions redox dans les compartiments des mitochondries, il se forme des flux pour chaque ROS permettant de comprendre leur activité. C'est pourquoi dans l'évaluation du statut antioxydant des mitochondries, il serait important de déterminer le taux de flux des ROS. L'utilisation

de MitoSOX red pour détecter les espèces mitochondriales réactives de l'oxygène (ROS) est bien repandue et donne des résultats bien interprétatbles. C'est une sonde fluorescente qui permet de détecter les espèces mitochondriales réactives de l'oxygène par imagerie de cellules vivantes.

Une fois la sonde introduite dans les cellules vivantes des mitochondries, le groupement triphénylphosphonium lipophile chargé positivement dans la sonde, s'oxyde en donnant le dihydroéthidium ou hydroéthidine qui possède une affinité vis-à-vis de l'anion superoxyde dans les cellules vivantes des mitochondries. Cette oxydation vire l'espace intercellulaire au rouge en fonction. Ceci est un indicateur de la présence des ROS et dépend de la concentration utilisée dans l'expérimentation.

Notre expérimentation a été effectuée comme suit :

Après achat du stock de Mitosox (5 mM), il a été stocké à -18°C à l'abri de la lumière pour éviter tout processus d'oxydation avant usage. Il a été testé à 5 mM et l'incubation avec les cellules a été observée pendant 10 min à -37°C (à l'abri de la lumière);

Le Mitracker a été acheté et conservé dans les mêmes conditions que le Mitosox. Il a été testé à 100 nM et 150 nM et l'incubation a été réalisée en 30 min à -37 °C. Il est conseillé de n'est pas dépasser 200 nM à cause du risque de perdre la spécificité du Mitotracker ;

Avant le prétraitement avec les extraits de pulpe de cavendish et de plantain (1mg/ml), les cellules sont déposées dans les plaques transparentes de 24 puits ensuite stimulées par LPS/IFN. Les cellules temoins sont traitées avec LPS/IFN seulement pour être stimulées. L'incubation des plaques dure pendant 2 heures (à 37°C, CO_2 à 5%). Dans le mélange (LPS/IFN), la concentration du LPS est de 1000 ng/ml et celle de l'IFN est de 100 ng/ml

Des cellules sont ensuite traitées avec l'extrait hydroalcoolique de pulpe de cavendish et de plantain *in vitro* après être stimulées par LPS/IFN. L'incubation pour cette phase dure également de 2 heures à 37 °C. Ce qui permet l'adhésion des cellules.

Il faut préciser cette expérience a été réalisée 3 fois pour confirmer l'effet antioxydant par le marquage mitochondrial.

1.4 Evaluation de l'activité anti-inflammatoire

Pour rechercher les effets anti-inflammatoires des extraits, nous avons utilisé un modèle *in vitro* de macrophage activés par l'association LPS/IFN. Dans ces conditions, les cellules produisent du NO, que l'on peut doser dans les surnageants de culture cellulaire, par la réaction colorimétrique de Griess. En parallèle, les cellules libèrent également des cytokines inflammatoires importantes, tells que TNF-α et IL-6 que l'on dose par une technique ELISA sandwich dans les surnageants de culture cellulaire.

1.4.1 Dosage du NO par la méthode de Griess

L'activité anti-inflammatoire des extraits hydroalcooliques de peau et de pulpe de banane cavendish et de planatin a été évaluée séparement *in vitro* dans un modèle inflammatoire de macrophages. Les cellules (5×105 /puits) ont été incubées en milieu RPMI complet, dans une plaque de 24 puits pendant 2 heures à 37 °C pour adhérer. Elles ont été ensuite prétraitées par différentes concentrations d'extraits de banane et de planatin (100, 50, 25 µg/ml) pendant 4 heures puis stimulées par l'association LPS (E. coli 055B5, 100 ng/ml) et IFN (10 ng/ml) puis incubées à 37 °C. Vingt quatre heures (24 h) après l'activation des cellules par le LPS/IFN, le médiateur inflammatoire NO (Oxyde Nitrique) est dosé dans le surnageant de culture sous forme de nitrites par la méthode colorimétrique de Griess.

100 µl/puits de chaque surnageant de culture cellulaire sont mélangés à 100 µl/puits de réactif de Griess en plaque de 96 puits. La plaque est incubée à l'obscurité pendant 10 minutes puis l'absorbance est mesurée à 550 nm au lecteur de microplaque conformément à la démarche de Boudard *et al.*, (1994).

Il faut préciser que le réactif de Griess est préparé extemporanément en mélangeant à volume égal une solution à 1 % (p/v) de sulphanilamide diluée dans l'eau distillée et une solution à 0,1 % (p/v) de naphtyléthylènediamine dihydrochloride diluée dans l'H_3PO_4 à 2%. Ainsi, la quantité de nitrites dans les surnageants de culture est déterminée à partir d'une courbe étalon de nitrite de sodium dans l'eau distillée (de 1,56 à 100 µM).

1.4.2 Dosage du NO scavenging

Le nitroprusside de sodium se décompose en milieu aqueux à pH 7,2 pour donner du NO. Le NO produit, en condition aérobie se transforme en nitrates/nitrites. La quantité de nitrites produite est ensuite dosée par la réaction colorimétrique de Griess (Parul *et al.*, 2013).

A partir d'une solution stock d'extraits de bananes à 10 mg/ml dans le DMSO, on réalise une gamme de dilutions successives au demi (de 25 à 100 µg/ml) dans l'HBSS. Les différentes dilutions sont ensuite incubées volume à volume avec une solution de nitroprusside de sodium (5mM, diluée extemporanément dans l'HBSS) pendant 2 heures à température ambiante sous une lampe. En parallèle, on réalise un témoin HBSS seul (0%) et un témoin sodium nitroprusside (100%). Le NO est ensuite dosé sous forme de nitrites par la méthode de Griess. Si les extraits piègent le NO produit par la dégradation spontanée du nitroprusside de sodium, la quantité de nitrites formés diminue comparativement au témoin nitroprusside de sodium sans extraits.

1.4.3 Effet des extraits sur la production des cytokines pro-inflammatoires TNF-α et IL-6

Pour tester l'effet des extraits sur la production des cytokines inflammatoires TNF-α et IL-6, les cellules ont été prétraitées pendant 4 heures avec les extraits de bananes avant d'être stimulées par le LPS/IFNγ comme décrit ci-haut. Six (6) ou quarante huit (48) heures après l'activation des cellules, les surnageants sont prélevés puis stockés à - 80°C jusqu'au moment du dosage des cytokines pro-inflammatoires, TNF-α et IL-6.

Comme mentionné ci-haut, le TNF-α et l'IL-6 sont dosés par une méthode ELISA (*Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay*) sandwich à l'aide d'un kit commercial (mouse TNFα Elisa Ready-SET-Go, eBiosciences). Le seuil de détection du TNF-α et l'IL-6 pour le kit est de 8 pg/ml.

1.5 Analyses statistiques

Les résultats des différents tests réalisés sont exprimés en moyenne ± esm ou SEM (erreur standard de la moyenne). La représentation graphique des données statistiques a été effectuée à partir du logiciel Graph Pad Prism 5.0 (Microsoft U.S.A) et le logiciel Excel. Ces résultats ont été également analysés par le test d'ANOVA one 75 way et d'ANOVA two-way suivis respectivement du test Bonferroni et

Bonferroni posttests pour les comparaisons multiples et la détermination des taux de signification. Les valeurs de $P \leq 0,05$ ont été considérées statistiquement significatives.

Troisième partie: Résultats

1. Extraction et rendement d'extraction des échantillons

Les méthodes traditionnelles de préparation et d'extraction des composés bioactifs sont de plus en plus souvent remplacées par des techniques avancées (Ngo *et al.*, 2017). Les protocoles d'extraction nécessitent une optimisation pour les échantillons végétaux à haute teneur en composés bioactifs comme les polyphénols (Peterson *et al.*, 1997; Carpentier *et al.*,2005; Aljanabi *et al*., 1999). Dans un premier temps, la procédure d'extraction doit être appropriée pour éviter l'influence des solvants et des substances interférentes. Egalement, le temps d'extraction, la température, le nombre d'extractions sont des paramètres cruciaux affectant le rendement d'extraction. La solubilité peut être affectée par tous ces facteurs. Une température plus élevée pourrait augmenter simultanément la solubilité et le transfert de masse ainsi que de diminuer la viscosité pour certaines molécules bioactives (Palmer, 1963, Peer *et al.*, 2001). Dans l'eau, la solubilité des composés phénoliques peut être limitée et même dans l'acide, cette solubilité pourrait être faible (Maulina, 2020). D'où la nécessité d'utiliser parfois des solvants mixtes.

Dans ce présent travail, avant la macération, le matériel végétal a été prétraité par congélation, lyophilisation, broyage et délipidation. Le choix du séchage par la lyophilisation permet de conserver les niveaux de contenu phénolique qui serait présent dans les échantillons de banane (Wuyts *et al.*, 2006). Ceci serait plus efficient que le séchage à l'air (Thomas et Nair 1971). La technique d'extraction solide-liquide a été utilisée pour la macération à la température ambiante comme dans plusieurs études scientifiques (Vaughn et Duke, 1984; Wuyts *et al.*, 2006 ; Chandrasekhar *et al.*, 2012). Des mélanges de solvants composés d'alcool, d'eau et d'acide acétique ont été utilisés pour réaliser les différentes macérations à l'image d'autres extractions réalisées même si les solvants polaires diffèrent (Someya *et al.*, 2002). Ce qui nous a permis d'obtenir les extraits secs enregistrés dans le tableau suivant:

Tableau 12: Résultats de l'extraction

N°	Cultivars	Extraits	Poids MF (g)	Poids extraits	Rendement/extrait (R %)
1	Banane cavendish	Peau MC	949,1	9,2	0,96
		Pulpe MC	583,6	6,4	1,09
2	Plantain	Peau MP	574,6	7,01	1,21
		Pulpe MP	557,4	6,1	1,09

MC : *Musa cavendish* ; MP : *Musa paradisiaca ;* MF : Matière Fraiche

Il ressort de l'extraction que pour des poids frais variant de 557,4 à 949,1g, la quantité d'extrait brut a été de 6,1 à 9,2 g avec des rendements d'extraction variant autour de 1%. On constate que les poids des extraits secs sont très bas comparativement aux poids frais. Ces résultats seraient liés aux faibles proportions de matière sèche dans la banane (7,7% à 12,9%) et dans le plantain (12,6% à 18,7%) (Emaga *et al.,* 2007). Par ailleurs, la peau qui représente seulement 40% de la matière sèche, contiendrait 89, 45% d'eau (Vu *et al.,* 2018).

2. Dosage des polyphénols totaux (TPC)

Le dosage des contenus en polyphénols totaux des extraits a été réalisé par le test de Folin-Ciocalteu (F.C). Le réactif de Folin-Ciocalteu (FC) est capable d'oxyder l'ensemble des composés phénoliques dans les extraits. Ce réactif de Folin-Ciocalteu (FC) est constitué d'un mélange d'acide phosphotungstique et d'acide phosphomolybdique de couleur jaune et virant au bleu lorsqu'il est réduit par les phénols. La coloration bleue produite possède une absorption maximale aux environs de 650 nm. Elle est proportionnelle au taux de composés phénoliques. Les résultats issus de ce test sont mentionnés dans le tableau suivant:

Tableau 13: Résultats du dosage des TPC des extraits analysés

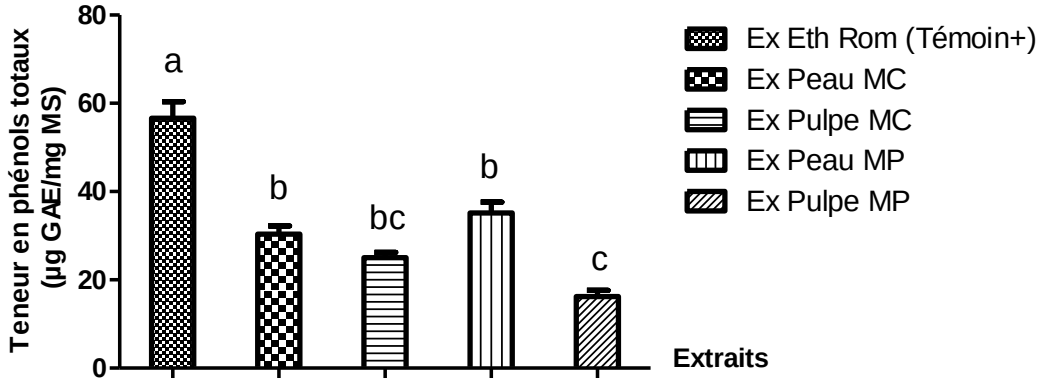
N°	*Cultivars*	*Extraits*	*TPC (µg GAE/mg MS)*	*TPC (mg GAE/g fw)*
1	Banane cavendish	Peau MC	30,33±3,33	0,29±0,03
		Pulpe MC	25,03±2,12	0,25±0,02
2	Plantain	Peau MP	35,18±4,20	0,42±0,05
		Pulpe MP	16,24±2,39	0,17±0,02
Extrait éthanolique de Romarin			56,65±3,68	ND

TPC= Total polyphénol Content, GAE= Gallic acid equivalent, fw= fresh weight basis

Les valeurs sont présentées sous forme de moyenne ± écart type (n = 3 expériences indépendantes)

ND : Non défini

L'histogramme qui découle de ce tableau se présente comme suit:



Les barres avec les lettres différentes indiquent des teneurs significativement différentes (P<0.05).

Chaque valeur représente la moyenne ± SEM de trois essais.

Figure 63: Dosage des teneurs en polyphénols totaux (TPC) des extraits

Les résultats exprimés en équivalent d'acide gallique, ont montré qu'à 1 mg/ml, l'ensemble des extraits possède une teneur inférieure au témoin (extrait éthanolique de Romarin**).** L'extrait de peau de plantain a le meilleur taux en polyphénol (0,42 mg GAE/g), suivie par l'extrait de peau de banane cavendish (0,29 mg GAE/g) qui ne présente pas de différence significative avec l'extrait de pulpe de la banane cavendish (0,25 mg GAE/g). La pulpe de plantain a donné la plus faible teneur en polyphénol (0,17 mg GAE/g) mais statistiquement, elle est sans différence significative avec la teneur de polyphénol dans la peau de banane cavendish (0,29 mg GAE/g) et dans la pulpe du même cultivar (0,25 mg GAE/g).

On constate le rapprochement statistique des teneurs de TPC dans les extraits de peau et de pulpe de ces 2 cultivars (banane cavendish et plantain de Guinée). Il faut préciser d'abord que le réactif de Folin peut réagir avec d'autres molécules comme les composés azotés, les thiols, les vitamines, les bases nucléotiques et hydrates de carbones. A cela, on peut ajouter le temps d'extraction, la température ambiante utilisés pendant l'extraction (Everette *et al.*, 2010). Sachant que la délipidation avait été réalisée pour éviter ce phénomène réactionnel ou d'interférence avec les lipides, ce constat serait attribué à l'existence de certaines molécules comme les protéines, les vitamines, l'amidon et les lipides résiduels pouvant réagir avec le réactif de Folin-Ciocalteu (FC). Pendant le test, on observait un précipité suite à l'ajout de la solution aqueuse de Folin-Ciocalteu (FC). Ce précipité pourrait conduire à une interférence lors de la lecture de la plaque.

3. Evaluation des activités antioxydantes

Comme expliqué précédemment, l'évaluation des activités antioxydantes des extraits d'agroressources et alimentaires est confirmée par la combinaison des réponses de tests différents et complémentaires pour avoir une idée plus ou moins précise sur la capacité antioxydante de l'échantillon à tester (Cao et Prior, 1998). Dans le cas présent, les méthodes de DPPH, ORAC et celle basée suu l'utilisation du MitoSox red ont été utilisées.

a) Méthode DPPH

Le DPPH (2,2-Diphenyl-l-picrylhydrazyl) est un radical azoté stable qui absorbe la lumière UV et visible avec un maximum d'absorption dans le méthanol à 515 nm. Lorsqu'il réagit avec un donneur d'hydrogène, il perd sa couleur. Le DPPH est relativement stable, il peut arriver que des antioxydants efficaces contre les dérivés réactifs de l'oxygène restent inertes face à lui (Prior *et al*., 2005). De plus, certaines de ses réactions sont réversibles et peuvent mener à une sous-estimation du potentiel des produits testés. Les acides hydroxybenzoïques et hydrocinnamiques réagissent lentement avec le DPPH. Le radical peut réagir avec d'autres radicaux alkyl et le ratio de concentration entre l'extrait testé et la solution de DPPH peut faire varier la linéarité de la courbe de réponse (absorbance) (Frankel & Meyer, 2000). C'est entre autre quelques limites d'application de la méthode DPPH.

b) Méthode ORAC

La méthode ORAC est un test antiradicalaire pour évaluer le potentiel des composés bioactifs présents dans un extrait à réduire les radicaux peroxyles (ROO.). Elle permet de mesurer la capacité antioxydante des composés lipophiles et hydrophiles. Dans ce travail, son application a consisté à suivre la perte de fluorescence de la fluorescéine, qui est un indicateur non protéique stable lorsqu'elle est oxydée par les radicaux peroxyles générés à partir du AAPH [2,2'-Azobis (2-methylpropionamidine) dihydrochloride] (Ou *et al.*, 2001*;* Číž *et al*., 2010). La Méthode ORAC est largement utilisée à cause de sa standardisation et son adaptation aux composés hydrophiles et aux composés lipophiles. Sa sensibilité à la température et sa sélectivité liée aux radicaux peroxyles constituent les inconvénients de son utilisation (Eversley, 2012).

Toutes ces explications dénotent le bien fondé de la combinaison des méthodes d'évaluation antioxydante.

Dans notre expérimentation, les résultats des 2 tests (DPPH et ORAC) sont exprimés en micromoles équivalent Trolox par gramme d'extrait sec (µmol TE/g). La valeur la plus élevée correspondra à l'activité antioxydante la plus forte.

Tableau 14: Résultats d'évaluation des activités antioxydantes des extraits selon DPPH et ORAC

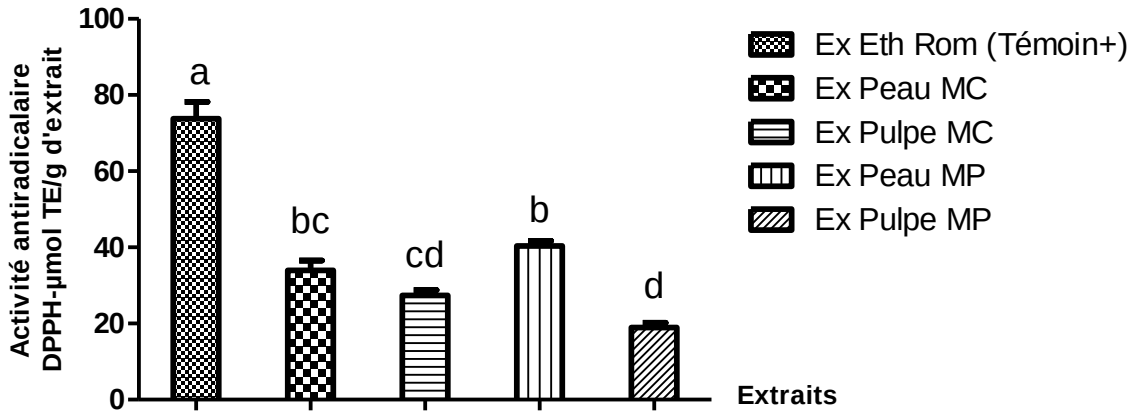
N°	Cultivars	Extraits	DPPH (µmol TE/g MS)	ORAC (µmol TE/g MS)
1	Banane cavendish	Peau	33,93±4,93	0,55±0,08
		Pulpe	27,37±2,47	0,55±0,05
2	Plantain	Peau	40,39±1,88	1,36±0,07
		Pulpe	18,96±2,09	0,34±0,005
3	Extrait éthanolique Romarin		73,81±4,39	2,44±0,14

DPPH: 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle; **ORAC :** Oxygen Radical Absorbance Capacity

MS: Matière sèche**; TE:** Equivalent trolox

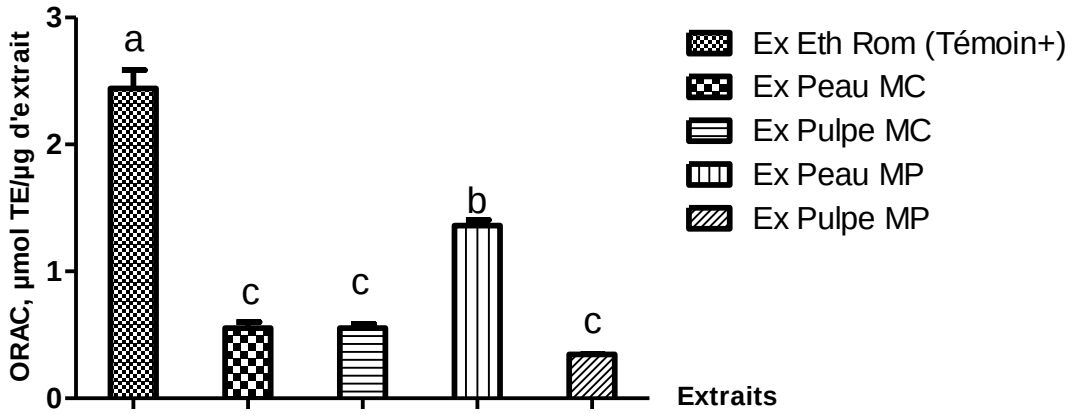
Les valeurs sont présentées sous forme de moyenne ± SEM (n = 3 expériences indépendantes)

Ces résultats peuvent être illustrés par les histogrammes suivants:



Les barres avec les lettres différentes indiquent des teneurs significativement différentes (P<0.05) Chaque valeur représente la moyenne ± SEM de trois essais

Figure 64: Capacité antioxydante des extraits par la méthode DPPH



Les barres avec les lettres différentes indiquent des teneurs significativement différentes (P<0.05).

Chaque valeur représente la moyenne ± SEM de trois essais.

Figure 65: Capacité antioxydante des extraits par la méthode ORAC

Considérant la méthode DPPH, les résultats illustrent que la peau de plantain possède la meilleure activité antiradicalaire (40,39 µmol TE/g), mais sans différence significative avec la peau de banane cavendish (33,93 µmol TE/g). Egalement la peau de la banane cavendish aurait des activités antioxydantes (33,93 µmol TE/g) statistiquement similaires à la pulpe du même cultivar (27,37 µmol TE/g). Par contre les activités antioxydantes de la peau de banane cavendish seraient meilleures (33,93 µmol TE/g) à celles de la pulpe de plantain qui a donné la plus faible valeur de DPPH (18,96 µmol TE/g). Les analyses statistiques montrent également que les pulpes des 2 cultivars banane cavendish et plantain, possèdent statistiquement la même activité antioxydante (18,96 µmol TE/g et 27,37 µmol TE/g) et que la peau de plantain aurait des effets antioxydantes hautement significatives à celles de la pulpe du même cultivar (respectivement 40,39 µmol TE/g et 18,96 µmol TE/g).

En considérant les résultats de la méthode ORAC, ils indiquent aussi que la peau du plantain aurait la capacité antioxydante la plus élevée (1,36 µmol TE/g). La peau de la banane cavendish possède la même activité antiradicalaire que la pulpe du même cultivar (0,55 µmol TE/g pour chaque type d'extrait). La peau et la pulpe de la banane cavendish auraient des activités antiradicalaires statistiquement similaires à la pulpe du plantain (0,55 µmol TE/g pour la peau et la pulpe de banane cavendish et 0,34 µmol TE/g). Les résultats de la méthode ORAC confirment ceux issus de la méthode

DPPH. Globalement, les résultats sont en phase avec les informations précédentes liées à quelques facteurs limitants des 2 méthodes comme: la sensibilité à la lumière, la sélectivité des molécules bioactives et le processus d'interférence qui n'est pas à négliger au sein des extraits (Prior *et al*., 2005 ; Eversley, 2012). Enfin, ces résultats sont conformes aux résultats issus du dosage des polyphénols par la méthode de Folin-Ciacalteu (FC).

c) Méthode Mitotracker

Comme expliqué précédemment, lorsque la sonde s'oxyde par la présence de superoxyde ou les ROS de façon générale dans les cellules vivantes, il se forme des spectres de fluorescence rouge qui se chevauchent considérablement. Cette fluorescence rouge indique bien la présence des espèces réactives à l'oxygène sans spécifier l'espèce partuclière. En terme de résultat, notre expérimentation est interprétée par les images suivantes:

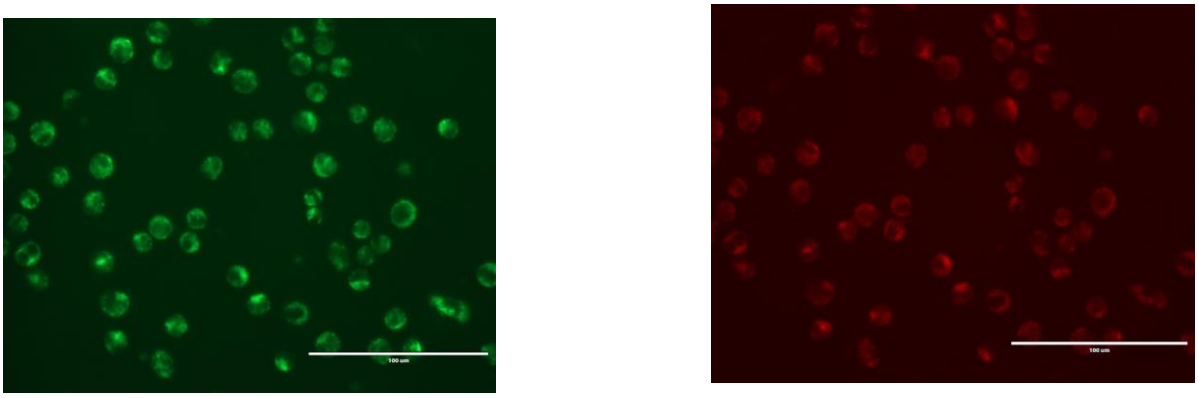


Figure 66: Cellule témoin sans traitement (ni LPS/IFN, ni extrait de banane)

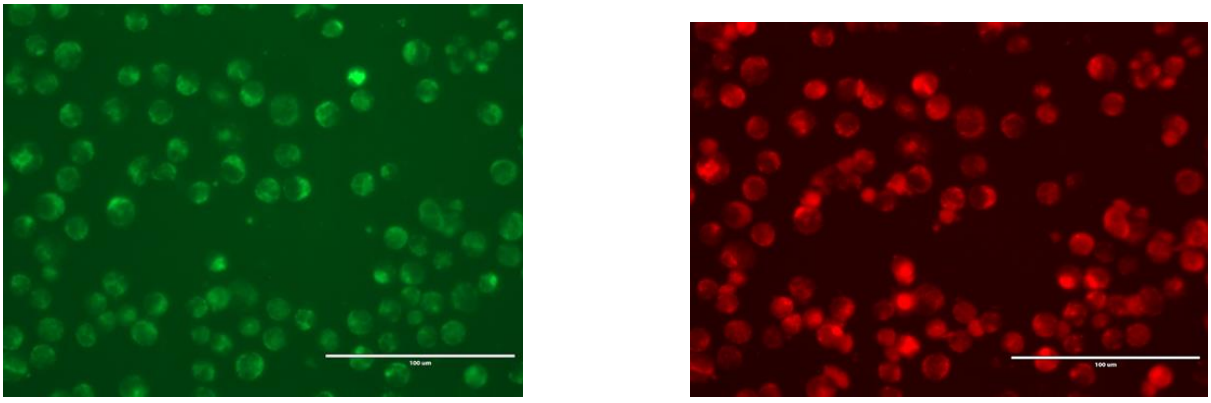


Figure 67: Cellules stimulées par LPS/IFN

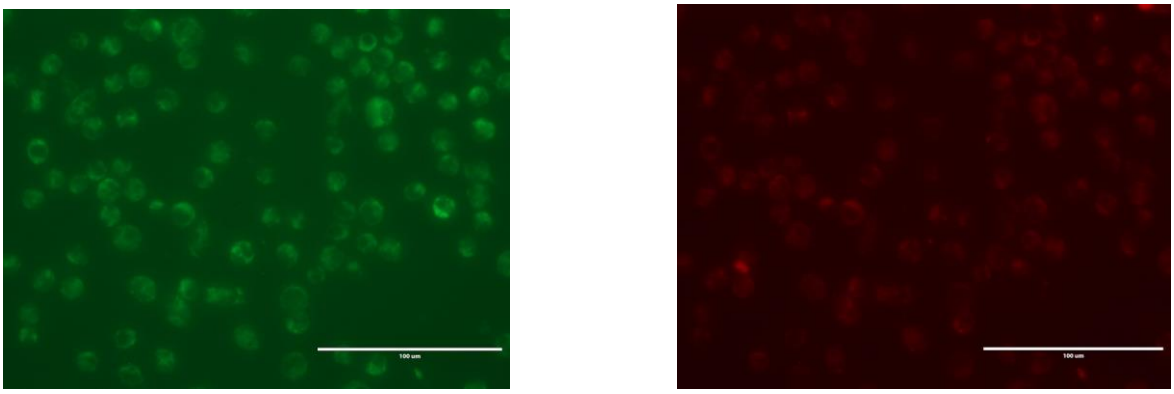


Figure 68: Cellules traitées avec les extraits de pulpe de plantain + LPS/IFN

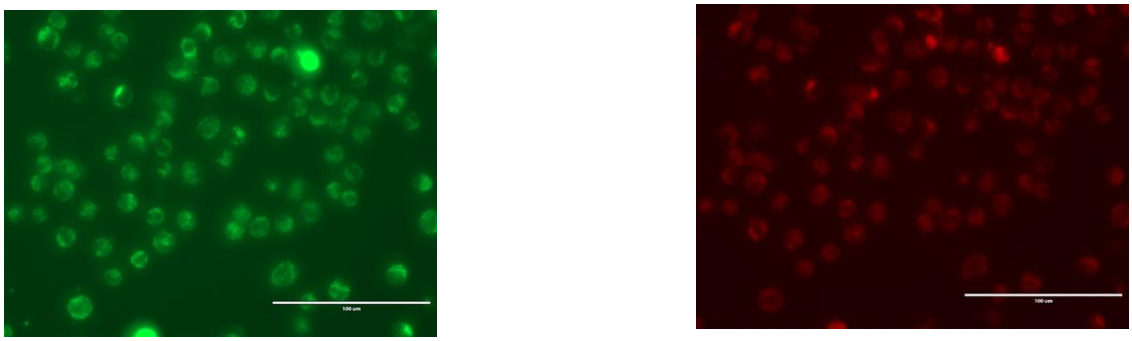
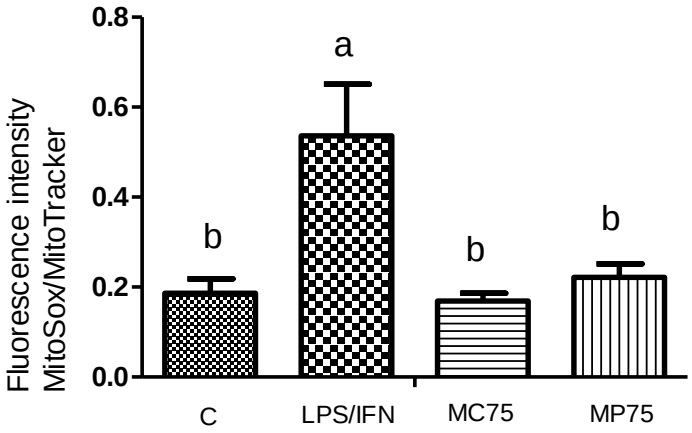


Figure 69: Cellules traitées avec les extraits de pulpe de cavendish + LPS/IFN

Ces résultats en image peuevnt également être représentés par l'histogramme ci-dessous :



Les barres avec des lettres différentes indiquent un contenu significativement différent (P<0,05);

Chaque valeur représente la moyenne des trois essais;

Pulpe MC= Pulpe de la banane cavendish; Pulpe MP= Pulpe de plantain.

Figure 70: Histogramme du marquage mitochondrial

Les résultats d'expérimentation traduisent par les images ci-dessus, indiquent bien la présence des radicaux libres provoquant le phenomène de stress oxydant avec l'introduction du Mitosox red dans les cellules. Nous remarquons une modification de la morphologie cellulaire marquée par l'apparition de nombreuses structures arrondies et distendues. Egalement, il se forme des spectres de fluorescence rouge comme l'indique la littérature. Cette fluorescence s'intensifie lorsque la cellule est exposée au processus d'oxydation suite à l'introduction de la sonde dans les cellules. La sonde détecte effectivement des ROS même si cela ne spécificie pas la nature de l'espèce reactive **(image 66)**. La présence des ROS est visiblement marquée par les spectres de fluorescence rouge. Plus les ROS sont nombreuses, plus les membranes cellulaires deviennent plus rouges. Cette fluorescence rouge est d'autant plus marquée lorsque les cellules sont stimulées ou stressées par LPS/IFN **(image 67)**. Ces ROS peuvent être des superoxydes qui sont les plus repandus dans les membranes cellulaires. Par ailleurs, on constate une modeste diminution de la fluorescence rouge lorsque les cellules sont traitées avec les extraits hydroalcooliques des pulpes de bananes de Guinée **(images 68 et 69)**. Ce qui signifie que les pulpes de bananes de Guinée protègent modestement les cellules contre le stress oxydant en réduisant le spectre de fluorescence rouge. Cela désigne la capacité antioxydante des extraits hydroalcooliques de pulpe de bananes de Guinée. A préciser que les cellules **(images 68 et 69)** ont été d'abord stimulées par LPS/IFN ensuite traitées par les extraits de bananes de Guinée.

Ces résultats présentés en image sont en phase avec les tests antiradicalaires précédents (DPPH et ORAC) réalisés avec les extraits de pulpes de bananes de Guinée.

Cette expérimentation basée sur l'illustration par détection des ROS par imagerie des cellules mitochondriales en utilisant le MitoSOX est bien efficace mais pourrait être difficile à interpréter lorsque la concentration de MitoSox dépasse 150 nM.

4. Evaluation des activités anti-inflammatoires

4.1 Dosage du NO

Il est à rappeler que les cellules ont été prétraitées avec différentes concentrations (100, 50, 25 µg/ml) des extraits de peau et de pulpe de banane cavendish et plantain de Guinée pendant 4 h avant leur activation. Le NO a été dosé dans les surgeants de culture cellulaire après 24h plus tard. Le LPS/IFNγ seul, stimule la production de NO par les macrophages.

Les résultats montrent que les extraits de peau de banane et de plantain stimulent la production du NO à l'image du LPS associé à l'IFNγ. Cependant les effets anti-inflammatoires des extraits de peau à différentes doses devraient permettre d'ihniber la production du médiateur NO. Ce qui signifie que nos extraits de peau de banane et de plantain testés à différentes doses (100, 50, 25 µg/ml) n'ont pas présenté d'effet anti-inflammatoire.

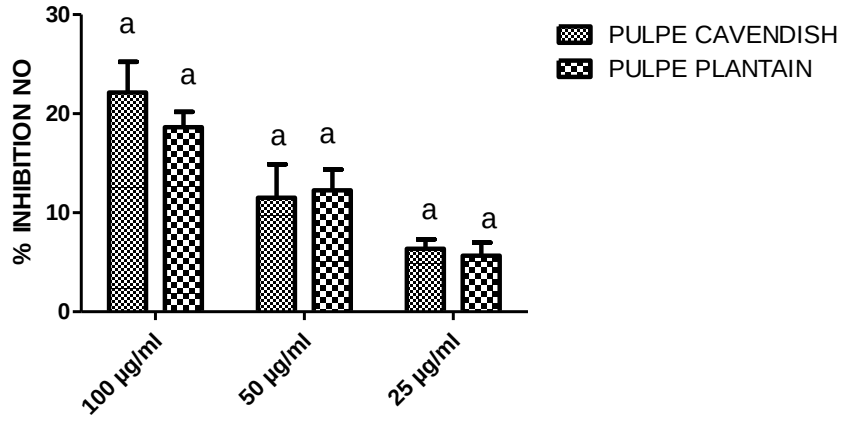
Par contre, les extraits de pulpe de banane et de plantain ont présenté un effet ihnibiteur du NO avec un effet visible en fonction des doses d'extrait utilisées pour les 2 matrices (banane et plantain) après un temps de prétraitement de 4 h. Ce qui confirme leur effet anti-inflammatoire. Les résultats issus de cette dernière experimentation se présentent comme suit:

Tableau 15: Dosage du NO

	Doses (µg/ml)		
Extraits	100	50	25
Pulpe MC	28,28	18,23	7,04
Pulpe MP	20,73	16,22	8,28

Pulpe MC= Pulpe de la banane cavendish; Pulpe MP= Pulpe du plantain

L'histogramme issu de cette expérimentation préliminaire se présente comme suit:



Les barres avec des lettres différentes indiquent un contenu significativement différent (P<0,05);

Chaque valeur représente la moyenne des trois essais;

Pulpe MC= Pulpe de la banane cavendish; Pulpe MP= Pulpe de plantain;

Y : niveau d'inhibition du NO;

X : doses d'extrait utilisées ;

NO : Oxyde nitrique.

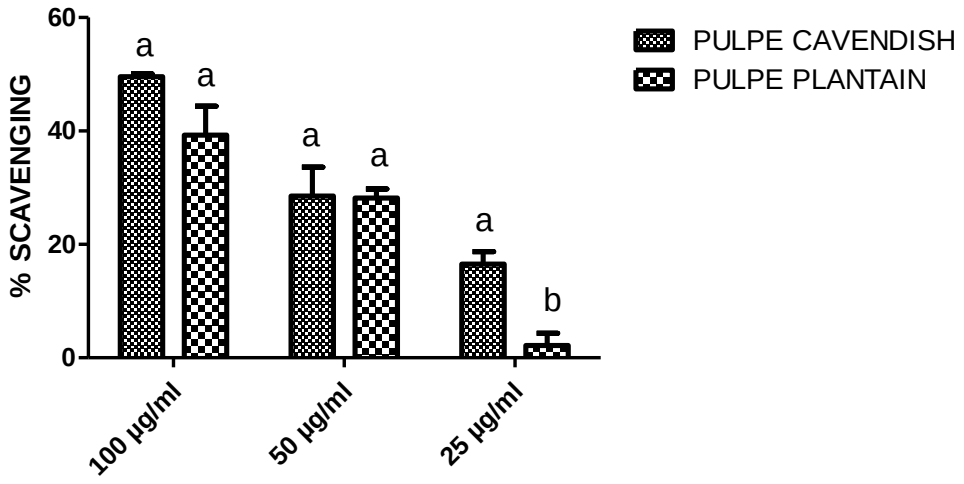
Figure 71: Histogramme d'inhibition du NO

Il ressort de cet histogramme des résulatst preliminaries, que les extraits de pulpe de banane et de plantain à 100, 50 et 25 µg/ml ont présenté un effet anti-inflammatoire lorsque les cellules sont prétraitées pendant 4h avec un temps de stimulation de 24h. Cet effet anti-inflammatoire est bien visible en fonction des doses d'extrait de banane et de plantain testées. Cependant, il faut souligner qu'il reste faible pour les 2 variétés (n'atteignant pas 50%).

4.2 Dosage du NO scavenging

Suite à l'effet inhibiteur des extraits de pulpe de bananes de Guinée sur le NO, nous avons chercher à comprendre leur effet inhibiteur du NO scavenging autrement dit s'ils piègent le NO formé. Le pouvoir des extraits à piéger le NO a été évalué par dosage du taux de nitrites présents après décomposition photochimique du nitroprusside de sodium (SNP) en présence de différentes concentrations des extraits (25, 50 et 100 µg/ml). Si les valeurs trouvées après calcul sont négatives, correspondant ainsi à une inhibition du NO produit par dégradation du SNP, on conclut que les extraits piègent le NO. Dans le cas

contraire, on observe une « accélération » de la dégradation du SNP. Les résultats montrent que les extraits hydro-alcooliques de bananes de Guinée piègent effectivement le NO scavenging avec un effet dose dépendant. Suite à ces résultats, on peut conclure que l'effet inhibiteur des extraits de pulpe sur la production du NO par les macrophages inflammatoires, est lié à une activité NO scavenging. Ces résultats sont illustrés par l'histogramme ci-dessous:



Les barres avec des lettres différentes indiquent des contenus significativement différents (P<0,05) ;

Chaque valeur représente la moyenne±SEM de trois essais.

Figure 72: Histogramme d'inhibition du NO scavenging

Ce test indique que les extraits de pulpe de banane ont une capacité de piégeage du NO scavenging de manière dose-dépendante (statistiquement différent selon les doses). La meilleure inhibition a été observé avec 100 µg/ml et la plus faible avec la dose 25 µg/ml pour les 2 variétés. A préciser que ces taux d'inhibition n'atteignent pas 50%, donc faible.

4.3 Dosage des cytokines pro-inflammatoires (TNF-α et IL-6)

Suite à l'activation des macrophages, les cytokines pro-inflammatoires TNF-α et IL-6 sont produites par les cellules puis libérées dans le surnageant cellulaire. Le TNF-α et IL-6 ont été dosés dans les surnageants de culture par une technique ELISA sandwich, 6 et 48 heures après activation des cellules par l'association LPS/IFNγ. Ce test revèle que les extraits de peau et de pulpe de bananes de Guinée n'ihnibent pas la production de ces cytokines activant l'inflammation en comparaison aux cellules non

stimulées. Cela indique que les extraits ne présentent pas d'effet anti-inflammatoire selon ce test de dosage des cytokines TNF-α et IL-6.

Il est à préciser que les 2 types d'extraits (peau et pulpe) ont été testés dans cette experiences. Aucun n'a produit des effets anti-inflammatoires.

Quatrième partie: Discussion

1. Extraction

Dans les travaux d'expérimentation, la phase d'extraction des biomolécules nécessite l'usage de solvants qui diffèrent du fait de leur polarité. Un solvant idéal devrait avoir les caractéristiques souhaitables suivantes: avoir une grande capacité de séparation du soluté, être sélectif, dissoudre le composant spécifique dans une large mesure tout en ayant une capacité minimale pour les autres composants, il doit être chimiquement stable. Ensuite, il doit être régénérable et il doit avoir une faible viscosité pour faciliter le pompage et le transport. Sa polarité se manifeste par un dipôle électrique permanent dans leurs molécules, car ses atomes ont des électronégativités différentes (Oroian et Escriche, 2015). Enfin, le rendement d'extraction des composés ayant une activité antioxydante comme les polyphénols est généralement influencé par les conditions dans lesquelles se déroule le processus d'extraction liquide-solide. Étant donné que chaque matrice végétale a des propriétés uniques en termes de structure et de composition, la réaction matériau-solvant résultant est imprévisible (Oroian et Escriche, 2015).

Ce présent travail dans sa phase d'extraction a combiné les solvants polaires et apolaires à différents niveaux. L'hexane, solvant apolaire a été utilisé pour la délipidation et la macération a été réalisée avec la combinaison des solvants polaires qui sont: l'eau, l'éthanol et l'acide acétique ayant tous une affinité pour les polyphénols des extraits végétaux. Nos résultats d'extraction donnent des quantités d'extrait qui varient de 6 à 9g pour des poids de matière fraiche variant de 557,4g à 949,1g, soit 1% de rendement moyen d'extraction. Les quantités relativement faibles d'extrait par rapport aux poids frais seraient liées à la proportion de matière sèche très faible dans les bananes et plantains frais (Vu *et al.,* 2018 ; Emaga *et al.,* 2007). La peau représente 40% du total de la matière fraiche (Anhwange *et al.,* 2008). Nos résultats sont similaires au résultat de recherches de Someya *et al.,* (2002) qui ont trouvé 3,07g avec 300g de pelure fraiche, soit 1% de rendement. A préciser que cette équipe a fait bouillir les pelures de banane dans 900 ml d'eau distillée pendant 5min et ensuite la pelure a été homogénéisée et l'extraction a été réalisée avec de l'eau à 90°C pendant 2 h. Cette température dans ce travail pourrait avoir des impacts sur les composés phénoliques comme l'acide hydroxycinnamique et le flavonol dans l'extrait sec car leur température de conservation serait de 80°C (Oroian et Escriche, 2015). Les solvants utilisés par Someya *et al.,* (2002) étaient le chloroforme, l'acétate d'éthyle et l'eau distillée. Cependant, dans notre expérimentation, nous n'avons pas fait bouillir nos échantillons dans l'eau mais dans l'hexane pendant la délipidation durant 24h. La macération à température ambiante pendant 24h à

l'aide des solvants Eau:Ethanol:Acide acétique. Dans le travail de Someya *et al.,* (2002), il a été utilisé le chloroforme, l'acétate d'éthyle et l'eau distillée. Nous avons séché notre extrait liquide hydroalcoolique pour obtenir l'extrait sec de la même manière que la phase d'acétate d'éthyle de Someya *et al.,* (2002), par la lyophilisation. L'utilisation de l'éthanol dans notre étude a des avantages pour l'extraction des composés antioxydantes, il est bon marché, réutilisable, non toxique et les extraits peuvent être utilisés dans l'industrie alimentaire (Chew *et al.,* 2011). Ce solvant possède le statut «GRAS» (généralement reconnu comme sûr selon l'*American Food and Drug Administration*) (Oroian et Escriche, 2015). L'acide acétique utilisé a pour effet de briser les membranes cellulaires et de libérer les biomolécules comme demontré dans plusieurs études (Castañeda-Ovando *et al.,* 2009; Chandrasekhar *et al.,* 2012). Il pourrait aussi protéger le matériau contre l'oxydation (González-Montelongo *et al.*, 2010). Il est donc important d'acidifier les solvants avec des acides organiques (acide formique ou acétique) plutôt qu'avec des acides minéraux comme 0,1% HCl (Castañeda-Ovando *et al.*, 2009). L'eau a été combinée à l'acide acétique pour faciliter l'extraction de produits chimiques solubles dans l'eau et/ou le solvant organique.

Enfin, il est à préciser qu'il n'existe pas de méthode d'extraction universelle applicable à l'extraction des composés phénoliques des matières végétales. Ceci en raison de la complexité des composés phénoliques et leur interaction avec d'autres molécules bioactives connues dans les matrices végétales (Chew *et al.*, 2011).

2. Dosage des polyphénols totaux (TPC)

La banane contient des composés bioactifs ayant un grand potentiel antioxydant qui contribue à la défense physiologique contre les réactions oxydatives et à la médiation des radicaux libres dans les systèmes biologiques (Singh *et al.,* 2016).

Parmi les composés phytochimiques bioactifs, les polyphénols ont été largement cités et étudiés comme les antioxydants les plus abondants fournis par l'alimentation humaine (Scalbert & Williamson, 2000). Ils peuvent exercer un large éventail d'activités biologiques, notamment des propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires contre le stress oxydatif lié à l'obésité et l'inflammation chronique (Siriwardhana *et al.,* 2013). Les fruits tropicaux comme les agrumes, l'ananas, la papaye, la banane, etc sont reconnues

comme des sources potentielles de polyphénols mais en raison de diverses limitations de ressources, le potentiel biologique est encore mal étudié.

La teneur totale en polyphénols des agroressources pourrait être utilisée comme un indicateur pertinent de la capacité antioxydante et comme marqueur préliminaire pour tout produit végétal susceptible d'être sélectionné et utilisé comme source naturelle d'antioxydants pour les aliments fonctionnels (Viuda-Martos *et al.*, 2011). En plus de cette capacité antioxydante, ils accomplieraient également un rôle primordial dans la stabilisation de la peroxydation lipidique (Del Carlo *et al.*, 2004 ; Gharby *et al.*, 2014) en interceptant l'oxygène singulet et en décomposant les produits primaires d'oxydation en des composés stables non réactifs.

Les polyphénols sont connus pour leur réactivité avec le Folin, souvent utilisé pour doser leur teneur dans des aliments et diverses ressources agricoles. Cependant, le terme polyphénols totaux semble être incorrect, car le réactif de Folin peut bien réagir avec d'autres molécules comme les composés azotés, les thiols, les vitamines, les glucides et les bases de nucléotides (Everette *et al.*, 2010; Morel *et al.*, 2018).

Dans notre étude, le niveau total de polyphénol trouvé pour la banane cavendish et le plantain de Guinée est inférieur à celui publié pour la banane de la Chine et de Malaisie (56 mg GAE/100g fw, soit 0,56 mg GAE/mg, en moyenne) (Chen *al.*, 2014; Lim *et al.*, 2017).

Les polyphénols totaux dans les pulpes de banane et plantain de Guinée (respectivement 0,29 mg GAE/g fw et 0,17 mg GAE/g fw) sont nettement supérieures aux teneurs des pulpes des cultivars (Pequea Enana, petite naine en français) (0,87 mg GAE/100 g fw, soit 0,0087 mg GAE/g fw) trouvés par Méndez *et al.,* (2003) et Gran Enana, grande naine (1,08 mg GAE/100 g fw, soit 0,0108 mg GAE/g fw) de l'étude de Singh *et al.*(2016). Alothman *et al.* (2009) ont obtenu 37.5 mg GAE/100 g fw, par le test de Folin–Ciocalteu pour la pulpe de *Musa paradisiaca* (plantain), supérieur à la valeur de TPC obtenue pour la pulpe de plantain de Guinée (17 mg GAE/100g fw). Cependant le contenu en polyphénol des pulpes de plantain de Guinée (0,17 mg GAE/g fw) serait très proche de celui du cultivar Raja, soit 0,20 mg GAE/g fw, rapportés par Sulaiman *et al.* (2011). Dans la même étude, la peau de banane cavendish de Guinée aurait une teneur en polyphénol (0,29 mg GAE/g fw) similaire à la pulpe du cultivar Mas (0,32 mg GAE/g fw) aussi la peau de banane Awak (0,48 mg GAE/g fw) aurait la

même teneur en polyphénol que la peau du plantain de Guinée (0,42 mg GAE/g fw). Toutes ces bananes sont des cultivars provenant de Malaisie. La peau de banane cavendish de Guinée a la même valeur moyenne de TPC que la farine de banane cavendish du Brésil (0,29 mg GAE/g fw), testée in vitro par Rebello *et al.*, (2014).

Conformément à plusieurs études sur différents cultivars de banane indiquant que les pelures sont plus riches en polyphénol que les pulpes (Someya *et al.*, 2002; Rebello *et al.*, 2014), les pelures du plantain de Guinée se sont révélées meilleures en polyphénols totaux (0,42mg GAE/g fw) par rapport aux autres extraits. Cependant l'écart reste négligeable entre la peau et la pulpe de banane cavendish (0,29 mg GAE/g fw et 0,25 mgGAE/g fw).Ce rapprochement des teneurs en TPC a été également constaté par Sulaiman *et al.* (2011). Dans cette étude réalisée sur le cultivar Kapas, ils ont trouvé 0,06 mg GAE/mg fw pour la peau et 0,05 mg GAE/mg fw pour la pulpe. Ces teneurs sont d'ailleurs très faibles par rapport à nos résultats.

Par ailleurs, la pulpe de banane cavendish de Guinée possède une teneur inferieure de polyphénols (0,25 mgGAE/g) par rapport à *Musa cavendish* (MAC) du Nigéria (0,94 mgGAE/g) selon les recherches effectuées par Adedayo *et al*.,(2016). Par contre, ils ont obtenu une teneur de TPC de la pulpe de banane Nipah de Malaisie (0,36 mg GAE/mg fw) supérieure à la valeur de TPC de sa peau (0,29 mg GAE/g fw). Enfin, leur extrait lyophilisé des pulpes de Raja a donné la teneur la plus élevée devant des multiples extraits de pelure (76,37 mg GAE/g fw). Ce qui prouve que la pulpe pourrait avoir une teneur en polyphénol similaire à celle de la peau ou supérieure, même si ce dernier cas n'a pas été observé dans notre expérimentation. Ces résultats peuvent être liés à plusieurs facteurs dont les principaux sont la variété ou le cultivar, les zones agroécologiques, les méthodes de dosage utilisant plusieurs solvants polaires et apolaires dans divers laboratoires. Borges *et al.*(2019) ajoutent que les teneurs en polyphénols peuvent aussi dépendre du niveau de maturation. Selon eux, les fruits mûrs sont plus riches en phénols et le stade 5 de maturation avec la couleur jaune-vert serait très riche en composés phénoliques. La même source signale que la pelure aurait souvent une teneur en polyphénols plus élevée que la pulpe. Il faut aussi noter que certaines complications surviennent lors de la récupération de composés phytochimiques à partir des sous-produits végétaux telles que les pelures de banane en raison de leur activité enzymatique élevée (González-Montelongo *et al.*, 2010). D'autre part, le Folin aurait réagit avec d'autres biomolécules non polyphénoliques, modifiant ainsi les teneurs en TPC soit dans la peau ou dans la pulpe. Le solvant d'extraction aurait extrait des molécules non

phénoliques comme les sucres, les protéines et les colorants qui peuvent interférer pendant l'évaluation phénolique (Djeridane *et al.*, 2006). D'après Tawaha *et al.* (2007) le dosage par le réactif de Folin-Ciocalteu donne une évaluation brute de l'ensemble des composés phénoliques d'un extrait végétal ou alimentaire. Il n'est pas spécifique aux polyphénols, car plusieurs molécules sont capables de réagir avec le réactif de Folin, donnant ainsi des teneurs apparemment élevées en composés phénoliques.

Enfin, des études antérieures ont montré que la teneur en polyphénol de la farine de pulpe débarrassée de sa peau pourrait se situer entre 11,8 à 90,4mg de GAE/100g fw (Balasundram *et al.*, 2006). Cet intervalle contient bien la fourchette des valeurs des moyennes de TPC de banane et de plantain de Guinée (17 mg GAE/100g à 25 mg GAE/100g fw).

3. Evaluation des activités antioxydantes

Dans l'évalaution des activités antiradicalaires des matrices végétales et des aliments, la combinaison des tests sembles être mieux indiquée pour se prononcer sur un extrait face aux radicaux libres. Dans le cas précis de la banane comme pour plusieurs fruits tropicaux, les tests les plus utilisés sont: DPPH, FRAP, ORAC et ABTS (Wu e*t al.*, 2004; González-Montelongo *et al.*, 2010; Sasipriya *et al.*, 2014). En fonction des laboratoires, 2 ou 3 de ces méthodes sont associées pour caractériser l'activité antioxydante.

La méthode DPPH une méthode facile et efficace pour déterminer la capacité antioxydante des échantillons. Sous sa forme radicalaire, le DPPH possède un pic d'absorption à 515 nm, mais l'absorption disparaît après réduction par un antioxydant ou une espèce antiradicalaire. L'extrait d'échantillon testé réagit très rapidement avec DPPH, en réduisant un nombre de molécules de DPPH égal à leur nombre de groupes hydroxyles disponibles. De plus, la DPPH a l'avantage de ne pas être affectée par certaines réactions secondaires des polyphénols comme l'inhibition des enzymes et la chélation des ions métalliques. Une solution de DPPH fraîchement préparée présente une couleur pourpre foncé à 515 nm qui pourrait disparaître progressivement en présence d'un bon donneur d'hydrogène (Babbar *et al.*, 2011). La méthode DPPH est basée sur une réaction de transfert d'électrons (mais considérée comme une méthode mixte par certains chercheurs)(Pinelo *et al.*, 2004) et la méthode ORAC est le test de capacité d'absorption des radicaux d'oxygène (ORAC) avec la fluorescéine comme sonde fluorescente (Wu e*t al.*, 2004). La méthode ORAC est également utilisée comme l'un des tests les

plus fiables et standard pour vérifier le potentiel antioxydant des matrices alimentaire et végétale (Pinelo *et al.,* 2004). En terme de coût et de temps d'exécution de cette méthode, le principal inconvénient de la technique ORAC est qu'elle nécessite l'utilisation d'équipements coûteux (Awika *et al.*, 2003). D'après la même source, l'interférence des protéines au cours du test, peut facilement biaiser les résultats de recherche.

Globalement, les résultats de test d'activités antioxydantes par les méthodes DPPH et ORAC indiquent que la banane cavendish et le plantain provenant de la Guinée, possèdent des activités antioxydantes proportionnelles à leurs teneurs en polyphénols comme confirmé par plusieurs auteurs (Emaga *et al.*, 2007; Singh *et al*., 2016; Borges *et al.*, 2019). Plus la teneur des matrices végétales et alimentaires sont riches en polyphénols plus leur activité antioxydante est grande.

Le test de DPPH a indiqué que la peau de plantain a statistiquement la même capacité antioxydante (40,39 µmol TE/g d'extrait sec) que la peau de banane cavendish (33,93 µmol TE/g d'extrait sec) et elles sont statistiquement supérieures aux autres extraits pour les 2 cultivars.

Les valeurs de DPPH indiquant les activités antioxydantes de nos extraits varient de 18,96 µmolTE/g dw à 40,39 µmolTE/g dw. Ces valeurs sont largement supérieures à celle de la farine de banane verte de Costa Rica (2,48 µmolTE/100g dw, soit 0,024 µmolTE/g dw) rapportée par Sarawong *et al.* (2014). Cette publication précise que l'activité antiradicalaire de cette banane est liée au total de polyphénols liés et libres dans sa farine native. (Sasipriya *et al.,* 2014) ont obtenu des activités antioxydantes de *Musa paradisiaca* (plantain) beaucoup plus élevées par rapport à celles des banane cavendish et plantain de Guinée et la farine de bananes vertes de Costa Rica expérimentées par Sarawong *et al.* (2014), soit 33625 µmolTE/g dw. Il faut préciser que leurs échantillons ont été récoltés dans le district d'Idukki dans la région de Kerala en Inde et les échantillons ont été extraits avec de l'acétone à 70 %. Dans la même étude, il a été noté que les espèces sauvages de banane ont une activité de piégeage des radicaux libres plus grande que les espèces commerciales (420194.7 µmolTE/g d'extrait pour les espèces sauvages) identifiées dans la même zone agroécologique. Bien que nous n'ayons pas utilisé les mêmes solvants, mais les méthodes d'extraction de nos extraits testés étaient similaires. Avant l'extraction, Sasipriya *et al.*(2014) ont dégraissé à l'éther de pétrole pendant 24 h tous les échantillons à l'image de notre phase de délipidation. Les échantillons ont été filtrés et les résidus d'échantillons ont été recueillis et séchés. Les résidus d'échantillon après séchage, ont été extraits en agitant avec de

l'acétone à 70 % (1:7 p/v) pendant 48 h à température ambiante dans un agitateur, également similaire à notre phase de macération. A l'image de notre procédé toujours, le surnageant a été filtré avec du papier filtre Whatman. Les résidus ont été réextraits avec de l'acétone à 70 % pendant 5 h, contrairement à notre expérimentation dans laquelle la 2ème macération a été réalisée en 24 h avec le solvant mixte constitué de 400 ml d'éthanol, 95 ml d'eau et 5 ml d'acide acétique. Le solvant de l'extrait combiné a été évaporé à pression réduite dans un évaporateur rotatif sous vide et l'eau restante a été éliminée par lyophilisation pour avoir l'extrait sec destiné aux tests tel que réalisé par notre laboratoire d'accueil.

Des peaux de bananes vertes (*Musa* sp., Groupe AAB, Sous-groupe Prata) achetées auprès du Centre d'approvisionnement (CEASA) de Campinas (São Paulo, Brésil) avant le traitement de maturation à l'éthylène, stockées à la température ambiante de 27±2°C et testées sur le plan de l'effet antiradicalaire en maturité après lyophilisation, ont donné en moyenne une valeur de DPPH égale à 380,37 µmolTE/g dw (Pereira *et al.*, 2017), nettement supérieure à nos résultats. A l'issu de l'étude réalisée par l'équipe de recherche de Borges *et al.*(2019) sur les génotypes de bananiers et de plantains à des fins de biofortification, principalement en raison de la teneur en amidon résistant (RS) et en polyphénols, la valeur de DPPH du génotype Tiparot après cuisson de 10min dans 300ml d'eau, était de 999.9 mg TE/g dw, soit 39,94 µmol TE/g dw. Ce résultat obtenu de la pâte de pulpe de ce génotype est similaire à la valeur de DPPH obtenu de la peau du plantain de Guinée (40,39 µmol TE/g dw) statistiquement égale à la valeur de DPPH de la peau de banane cavendish provenant de la Guinée (33,93 µmol TE/g dw), ce qui signifie qu'elles ont des activités antioxydantes similaires. De même que la pulpe de banane cavendish de Guinée aurait la même activité antiradicalaire que la pâte de pulpe fraiche du génotype Ney Poovan, soit respectivement 27,37 µmol TE/g et 28,51 µmol TE/g. La peau de la banane cavendish et la pulpe de plantain de Guinée présentent des capacités de piégeage des radicaux libres (DPPH=33,93 µmol TE/g et 18,96 µmol TE/g, respectivement) semblables à celles de la pulpe du génotype Simili Rajah (844,8 mg TE/100g, soit 33,74 µmol TE/g) et du génotype Pepita (448 mg TE/100g, soit 17,89 µmol TE/g). Nos extraits ont présenté des activités antioxydantes toutes supérieures à celle des pulpes des plantains d'Angola après cuisson dans 300 ml d'eau pendant 10 min (295.8 mg TE/100g soit 11,81 µmol TE/g).

D'autre part, la méthode ORAC a été combinée à la méthode DPPH pour se prononcer sur les activités antioxydantes de nos différents extraits. La méthode ORAC a confirmé que la peau de plantain possède une meilleure activité antioxydante par rapport aux autres extraits et que sa pulpe aurait moins de

pouvoir de piégeage des radicaux libres. Cependant, il faut souligner que nos résultats étant encore exprimés en µmol TE/g d'extrait, les valeurs ORAC (de 0,34 à 1,36 µmol TE/g d'extrait sec) sont très petites comparativement aux valeurs de DPPH qui oscillent entre 18,96 à 40,39 µmol TE/g d'extrait. Cela nous paraît être lié à un phénomène d'interférence des macromolécules comme les protéines. C'est aussi en liaison avec les limites de la méthode ORAC telles qu'indiquées ci-haut. C'est un test qui détecte les changements chimiques dans une molécule fluorescente provoqués par une attaque de radicaux libres. Il est basé sur des radicaux peroxyle qui reflètent des perturbations physiologiques pertinentes (Floegel *et al.,* 2011).

Nos résultats sont inférieurs à la valeur ORAC rapportée par Floegel *et al.* (2011), soit 879 µmol TE/100g ou 8,79 µmol TE/g pour la banane consommée en Amérique. Cette recherche visait à connaître les capacités antioxydantes de 50 fruits dont la banane, légumes et boisson dans le régime alimentaire américain. Dans leur étude, les échantillons de banane ont été lavés, séchés, hachés et l'extraction a été faite avec du méthanol absolu 80% avant les tests antiradicalaires. Dans notre recherche, les pelures de plantain de Guinée souvent destinées à l'alimentation animale et la pastèque américaine testée par cette équipe, ont des capacités antioxydantes similaires (soit les valeurs ORAC respectives de 1,36 µmol TE/g et 1,42 µmol TE/g dw).

Lorsque nous comparons nos valeurs ORAC à celles de la farine de peau de banane non mûre de la variété Nanicão étudiée par Menezes *et al*. (2011) et du test du surnageant issu de la banane Nam-wa réalisé par Patthamakanokporn *et al.* (2008), nous constatons d'abord que ces 2 agroressources possèdent la même activité antiradicalaire (ORAC= 2,61 µmol TE/g d'extrait sec pour chaque variété), supérieures à nos résultats. Nos résultats sont encore beaucoup plus inférieurs à la valeur moyenne trouvée pour la peau de banane cavendish non mûre du Brésil, testée par Rebello et ses collaborateurs en 2014, soit 435,5 µmol TE/g dw.

(Wu *et al.,* 2004) ont travaillé sur le potentiel antiradicalaire de 100 aliments composés de fruits et légumes frais, des noix, des céréales, etc boisson, etc. L'équipe a utilisé la méthode ORAC en déterminant séparément la capacité antioxydante des composés phénoliques lipophiles et hydrophiles ensuite calculer la valeur ORAC totale pour chaque aliment. Ils ont révélé que l'activité antioxydante des composés lipophiles contenus dans la banane était inférieure (0,66 µmol TE/g dw) à celle des composés hydrophiles (8,13 µmol TE/g dw), et le cumule des 2 fractions de composés lipophiles et

hydrophiles a donné 8,79 µmol TE/g dw. La peau et la pulpe de banane cavendish de Guinée ont des capacités de piégeage des radicaux libres similaires à celle des composés lipophiles de la banane échantillonnée par Wu *et al.*,(2004).

En utilisant la méthode de detection des espèces réactives à l'oxygène dans les membranes cellulaires par imagerie, les pulpes du cavendish et du plantain guinéen ont été modestement efficace en protégeant les cellules contre les radicaux libres. Ceci était perspectible par la modification légère de la structure cellulaire et par la présence des spectres rouge lorsqu'on le MitoSox red est utilisé à 5 µM et Notre résultat d'expérimentation est conforme à celui trouvé par Kauffman *et al.*, (2016) qui recommande l'utilisation de la sonde MitoSox red à 5 µM pour détecter les ROS. La présence de spectre de fluorescence rouge a été rapportée aussi par Zielonka *et al.,* (2010) et Roelofs *et al.*, (2015) suite à l'oxydation du MitoSox qui aboutit à la formation de ce spectre.

Il faut dire que nous n'avons pas trouvé d'article détaillant mieux le cas spécifique de la banane et encore moins des études sur la banane de Guinée.

En conclusion, il est à noter que la peau de plantain de Guinée aurait la meilleure activité antioxydante par rapport aux autres matrices même si le test de DPPH révèle que la peau de la banane cavendish se rapprocherait bien d'elle. Egalement sa pulpe serait la plus faible au point de vue potentiel de piégeage des radicaux. Notre étude indique d'autre part que la peau de la banane cavendish et sa pulpe possèdent des activités antioxydantes similaires. Suivant la méthode de marquage mitochondrial, la pulpe des 2 agrossources de Guinée protégerait les membranes cellulaires contre le superoxyde.

4. Activité anti-inflammatoire

Les macrophages sont des cellules qui jouent un rôle central et essentiel dans le processus de défense de l'organisme contre diverses agressions dans le but de maintenir son intégrité (Kuo *et al.,* 2011). A travers leurs récepteurs appelés PRR (Pathogen Recognition Receptors) notamment les TLR (Toll like receptors) se trouvant à leur surface, ils sont capables de reconnaitre la nature de l'agresseur (Liu *et al.,* 2017; Amarante-Mendes *et al.,* 2018). Cette reconnaissance conduit à leur activation (Sterka et al., 2006; Rubartelli *et al.,* 2007) et est accompagnée par la production de nombreux médiateurs pro-inflammatoires et anti-inflammatoires qui assurent l'autorégulation de l'inflammation et la protection de l'hôte. Parmi ces molécules sécrétées par les macrophages, on peut citer l'oxyde nitrique (NO) et le

Tumor Necros Factor alpha (TNF-α). Il est rappeler que le NO est une molécule instable, qui se transforme rapidement en nitrite dans la cellule et ne possède pas de récepteurs cellulaires, cependant il peut agir sur sa cellule cible de manière autocrine (NO endogène) ou paracrine (NO exogène).

Lorsque la production du NO est bien maitrisée, cette biomolecule joue un rôle bénéfique pour l'organisme et se comporte comme un véritable médiateur pro-inflammatoire (Pacheco sanchez, 2006) en induisant des effets cytotoxiques contre les champignons, les virus et les cellules bactériennes. Il participe au recrutement des neutrophiles et provoque également une relaxation des muscles (Korhonen *et al.*, 2005; Raghav et *al.,* 2006; Dahboul, 2013). Par contre, à des concentrations élevées, le NO possède des effets délétères vis-à-vis des cellules de l'organisme pouvant aller de la cytotoxicité à des lésions cellulaires conduisant ainsi à la mutagenèse, donc responsable du développement de plusieurs maladies chroniques.

Au regard des résultats de dosage des polyphénols et de ceux des tests anti-oxydantes avec une meilleure dose de polyphénols et une meilleure activité antiradicalaire des peaux de bananes de Guinée, il a été proposé de tester tout d'abord les extraits hydroalcooliques de peau. Selon plusieurs études en phase avec nos résultats ci-dessus, la peau de banane serait plus riche en phytoconstituants que la pulpe. Par différentes méthodes de test phytochimiques, il a été prouvé que la peau de banane aurait des activités anti-oxydantes, anti-inflammatoire, analgésique, etc plus élevées que celles de la pulpe (Olaleye *et al.*, 2012; Yuei *et al.*, 2016).

Contrairement à nos résultats de l'activité anti-oxydante, il faut préciser que les peaux des bananes de Guinée n'ont montré aucun effet anti-inflammatoire avec les doses d'extrait de 25, 50, 100 µl/ml. A ces différentes doses, les extraits hydroalcooliques de peau ont stimulé ou sont restés sans effet sur la production du médiateur inflammatoire NO (Oxyde Nitrique), du NO scavenging, des cytokines pro-inflammatoires, TNF-α et IL-6. Leur effet anti-inflammatoire, devrait être mesuré par leur capacité à inhiber la production de ces différentes biomolécules au fur et à mesure de l'augmentation de la dose d'extraits avec un temps de stimulation selon les méthodes d'expérimentation utilisées. Ces extraits pourraient présenter des effets anti-inflammatoires à des doses supérieures à celles testées par notre équipe? Ces résultats seraient certainement en liaison avec les pratiques agricoles des producteurs de banane en Guinée qui utilisent des pesticides et engrais pouvant affecter certaines activités biologiques des extraits même si ces intrants ne sont pas utilisés à forte dose. Après l'obtention de ces résultats,

nous avons échangé avec les producteurs de nos bananes testées qui ont effectivement confirmé l'utilisation des insecticides et engrais dans les bananeraies de façon générale en Guinée.

A la lumière de toutes les fouilles bibliographiques, il faut dire que ces résultats sont noveaux.

Dans l'étude de Yuei *et al.,* (2016), il a été utilisé des extraits éthanoliques administrés par la voix orale aux rats à des doses de 200 mg/kg et 400 mg/kg d'extraits de peau. La dose de 400 mg/kg a donné la meilleure activité anti-inflammatoire (63% d'inhibition en 6h). Dans cette experimentation, l'eau a été utilisée comme contrôle négatif (10 ml/kg) et le diclofenac sodique (10 mg/kg) comme contrôle positif.

En comparaison à notre étude, il est important de souligner que nous n'avons pas utilisé le même type d'extrait (hydroalcoolique dans notre cas) et les tests sur les cellules (chez les rats dans leur étude).

La poursuite de cette étude est bien envisageable pour des recherches post doctorales en testant des doses d'extrait de peau de banane de Guinée ayant des teneurs de bioactifs notamment les polyphenols plus élevées tout en évaluant la viabilité des cellules en amont. Selon Apostolopoulos *et al.*,(2017), des études approfondies sur les bananes vertes doivent permettre de comprendre les mécanismes anti-inflammatoires de ces agroressources.

Dans la poursuite de comparaison de nos résultats à ceux des recherches antérieures, nous avons compris que la peau de banane (verte et mûre) de Thailande, aurait des effets anti-inflammatoires signicatifs (MPharm, 2012). Cet auteur en utilisant des extraits aqueux et éthanolique, a obtenu les résultats suivants:

L'extrait aqueux de peau fraîche et mûre a présenté l'activité inhibitrice de NO la plus puissante avec une valeur IC50 de 6,68 + 0,34 µg/ml;

L'extrait éthanolique à 95 % de peau de banane non mûres séchées (IC50 = 36,62 + 3,68 g/ml) et 50% d'extrait éthanolique de peau de banane thailandaise mûre (IC50 = 54,69 + 1,71). A préciser que le temps d'incubation était de 48h contrairement à notre contexte qui était de 24h.

Ces extraits étant obtenus différemment à notre procédure d'extraction des extraits, il est sans doute que nos résultats de recherche ne soient pas identiques. Nous avons lyophilisé nos échantillons avant

d'obtenir l'extrait sec avant de broyer, tandisque MPharm a carrement seché ses échantillons de peau de banane dans un four à air chaud à 50°C et broyé en poudre fine.

Par rapport à la pulpe de banane de Guinée, nos résultats comparés à ceux de Yuéi et de MPharm, ci-dessus cités, nous constatons que l'effet dose est corrolaire à l'effet anti-inflammatoire. Parmi les 3 doses testées, 100µg/ml a donné le meilleur effet d'inhibition du NO (pour les 2 variétés expérimentées, suivie de 50 µg/ml et enfin 25 µg/ml). Malgré que le taux d'ihnibition soit bien correllés à la dose, il n'a pas atteint 50% pour les extraits hydroalcooliques de pulpe des 2 variétés. Ce qui laisse sous entendre que l'effet anti-inflammatoire des extraits de pulpes de banane de Guinée serait faible avec les extraits hydroalcooliques obtenus par lyophilisation, délipidation et macération. Les taux d'inhibition se situent entre 7, 04% à 28% pour les 2 variétés (cavendish et plantain). Ces taux d'inhibition pourraient s'élever en augmentant les doses d'essai au fur et à mesure.

L'amidon, l'un des polysaccharides les plus importants de la pulpe de banane, est un mélange polymère de polymères de glucose, d'amylose et d'amylopectine. Sa proportion dans la peau de banane serait très faible par rapport à la pulpe. D'autres polysaccharides comme des homogalacturonanes, de l'arabinogalactane, du rhamnogalacturonan et du mannane, ont déjà été identifiés dans la pulpe de banane avec plusieurs effets santé. L'α - D- (1→6)-glucane pourrait favoriser de manière significative l'activité pinocytaire et la production d'oxyde nitrique (NO), d'interleukine-6 (IL-6) et de facteur de nécrose tumorale-α (TNF-α) (Wen et al., 2019). Les extraits de pulpe ont inhibé la production du NO et du NO scavenging de manière dépendante. Cet effet d'inhibition dose-dépendante pour les extraits de pulpe des 2 variétés reste faible (n'atteignant pas 50%). Cette inhibition de la production du NO et du NO scavenging en corrélation avec la dose est conforme à des études multiples réalisées sur les produits agricoles d'origine tropicale dont les activités anti-inflammatoires ont été prouvées (Someya et al, 2002). La capacité des extraits de pulpe de banane de Guinée à piéger des radicaux libres pourrait être en relation avec des macromolécules comme les polysaccharides. Ces biomolécules ont la capacité d'inhiber la production du NO et du NO scavenging avec un effet lié à la dose (Yang *et al.,* 2021). Dans la banane verte, il existerait des polysaccharides importants comme l'arabinogalactane (Horie *et al.,* 2020).

La production de la nécrose tumorale facteur alpha (TNF-α) et de l'interleukine-6 (IL-6) par les cellules macrophages prétraitées avec les extraits de bananes de Guinée et stimulées, n'a pas été inhibée. Par

contre, pendant le dosage du TNF-α, il a été constaté une légère stimulation des cellules macrophages. Aucun des extraits même à 100 µg/ml, n'a montré des effets immunomodilateurs ou immunostimulateurs par rapport à la production de la cytokine interleukine-6 (IL-6). Cela indique l'inaction totale des bioactifs anti-inflammatoire dans ces extraits. Nous estimons que ces résultats seraient en liaison avec la nature hydroalcoolique de nos extraits. Les résultats obtenus de l'effet des extraits sur la production des cytokines pro-inflammatoires, TNF-α et IL-6 ne sont pas conformes aux travaux de recherche indiquant qu'une intervention diététique avec de la farine de banane naine verte (5 % ou 10 %), qui augmenterait la concentration d'acétate, de propionate et de butyrate. Ceci a pu éviter la rechute des symptômes des maladies inflammatoires de l'intestin dans cette recherché (Scarminio *et al.,* 2012). Ce qui démontre aussi que la voie d'administration influençerait l'efficacité des bioactifs dans une agroressource. Dans une autre étude, des extraits de pulpe de banane ont conduit à un étalement marqué des macrophages en fonction des souches cellulaires. Ensuite, il a été constaté dans la même étude l'induction du TNF-α en fonction de la maturité et de la variété des bananes (Iwasawa, H., & Yamazaki, M. 2009). Par ailleurs dans une autre recherche scientifique, il est mentionné qu'aucune enquête sur l'activité immunomodulatrice des polysaccharides de la banane n'a été rapportée (Wen *et al.,* 2019).

L'inactivité des extraits de peau de banane pourrait être en relation avec la technique d'extraction, les doses d'extrait, les variétés de banane et les conditions de culture, etc (Horie et al., 2020). Dans la banane, les polysaccharides sont les composants bioactifs prédominants (Shen *et al.,* 2017; Wen *et al.,* 2019).

Cinquième partie: Conclusion et perspectives

La banane est un fruit parthénocarpique dérivant de l'inflorescence femelle du bananier. Le bananier issu des planataions traditionnellles demande un sol bien drainé, profond et légèrement acide. Les bananes et les plantains sont parmi les cultures fruitières les plus cultivées dans le monde. Ils sont consommés frais (banane à dessert) ou cuits (banane à cuire). Ils constituent un aliment de base à des millions de personnes dans les pays en développement. Certains pays comme l'Inde, l'équateur, le Pérou, le Costa Rica, les Philippes, le Mexique, le Cameroun, la Tanzanie, le Brésil, l'Ouganda, etc., la banane constitue l'essentiel de leur export et elle contribue dans une large mesure à la stabilisation de leur économie. L'Union Européenne et les USA sont parmi les plus gros importateurs. La France reste l'un des pays important énormement de banane.

Dans plusieurs études scientifiques, il a été démontré que la banane renferme un potentiel nutritionnel et thérapeutique intéressants. A l'état vert ou mûr, la banane contient un taux important d'amidon, de sucre, de fibre, de lipides, de protides, de polyphénols, de minéraux, des vitamins, etc qui font d'elle un aliment bien apprécié. La peau de banane renferme une proportion significative de bioactifs par rapport à la pulpe. La poudre de peau de banane serait utilisée comme support de filtration des métaux lourds dans l'eau et les usines d'engrais (cadmium contaminant naturel des phosphates). Sa composition en éléments bioactifs lui confère des propriétés biologiques intéressantes (anti-oxydante, , analgésique, anti-inflammatoire, etc). En phytothérapie, la banane est utilisé contre la diarrhée, les vers, la constipation, etc

Malgré toutes ces importances ci-dessus citées, les bananes de Guinée n'ont pas encore fait l'objet de grande étude. D'où le caractère innovateur de notre travail.

Toutes fois, il est à noter que plusieurs études ont été réalisées sur la banane en provenance de plusieurs coins du monde. En s'appuyant sur les résultats des études antérieures, nous nous sommes résolument orientés sur l'évaluation des propriétés biologiques des bananes cavendish et plantain de Guinée, précisement ceux cultivés dans le champ experimental du CRAG dans la prefecture de Kindia. Dans cette bananeraie, la pratique agricole utilise de l'engrais de fond et de couverture à faible dose. Les bananes ont été récolteés, conditionneés et acheminées sur le laboratoire de l'équipe 5 de l'UMR Qualisud à Montpellier en 24h. Au laboratoire, les bananes ont été conservées à -20°C, avant d'être épluchées, lyophilisées, broyées, délipées et macérées pour obtenir des extraits secs hydroalcooliques. Après avoir obtenu l'extrait sec, il a été procédé au dosage des polyphénols avant d'entamer

l'évaluation des propriétés biologiques, centre d'intérêt de notre étude. Au terme de ce dosage, il a été décelé que la peau renfermait plus de composés phénoliques que la pulpe pour les 2 variétés expérimentées. Ce qui était conforme à plusieurs résultats de recherche retrouvés dans les bases de données scientifiques.

Pendant le test d'activité antioxydante, les résultats obtenus étaient conformes au dosage des polyphénols totaux dans les extraits. Globalement, les peaux pour les 2 variétés de bananes se sont revelées plus antiradicalaires que les pulpes et la peau de plantain a donné de meilleur résultat avec les différentes méthodes utilisées (DPPH, ORAC). Conformement à la méthode de Mitotracker, nous avons testé les extraits de pulpe des 2 bananes. Il ressort que les pulpes des bananes de Guinée protégeraient les cellules contre le superoxyde (SOD) après l'introduction d'un MitoSox Red.

Contrairement aux résultats de l'évaluation des capacités antioxydantes, les extraits de peau des 2 bananes de Guinée n'ont pas produit d'effet anti-inflammatoire. Ce qui n'a pas été retrouvé dans les publications scientifiques consultées. Ceci nous amène à pointer les pratiques agricoles, le processus d'extraction des extraits secs, les doses testées, qui peuvent influencer les résultats. Cependant la pulpe a donné de bon résultat anti-inflammatoire en correlation avec les doses testées avec le dosage du NO et du NO scavenging. Ce qui est également en phase avec plusieurs études portant sur la peau, la pulpe ou sur la banane entière. Il faut rappeler que l'évaluation de l'activité anti-inflammatoire a été réalisée en se basant sur le dosage du NO, du NO scavenging, du TNF-α et de l'IL-6 en culture *in vitro.* Il est important de signifier aussi que le temps de séjour à Montpellier n'a permis de tester tous nos échantillons. C'est pourquoi, nous recommandons des études postdoctorales sur ces agroressources pour obtenir plus de résultats et d'informations. Des études ultérieures portant sur l'analyse physico-chimique de nos extraits permettraient de mieux appréhender les sources de variations de résultats entre banane cavendish et plantain d'une part, entre peau et pulpe d'autre part.

BIBLIOGRAPHIE

Alkarkhi, A. F., bin Ramli, S., Yong, Y. S., & Easa, A. M. (2011). Comparing physicochemical properties of banana pulp and peel flours prepared from green and ripe fruits. *Food Chemistry*, *129*(2), 312-318.

Adao, R. C., & Glória, M. B. A. (2005). Bioactive amines and carbohydrate changes during ripening ofPrata'banana (Musa acuminata× M. balbisiana). *Food Chemistry*, *90*(4), 705-711.

Adedayo, B. C., Oboh, G., Oyeleye, S. I., & Olasehinde, T. A. (2016). Antioxidant and antihyperglycemic properties of three banana cultivars (Musa spp.). *Scientifica*, *2016*.

Adib-Conquy, M., & Cavaillon, J. M. (2012). Réponse inflammatoire et anti-inflammatoire de l'hôte au cours du sepsis. *Pathologie Biologie*, *60*(5), 306-313.

Adisa, V. A., & Okey, E. N. (1987). Carbohydrate and protein composition of banana pulp and peel as influenced by ripening and mold contamination. *Food chemistry*, *25*(2), 85-91.

Aggarwal, B. B., Shishodia, S., Sandur, S. K., Pandey, M. K., & Sethi, G. (2006). Inflammation and cancer: how hot is the link?. *Biochemical pharmacology*, *72*(11), 1605-1621.

Ahmed, Z. F., & Palta, J. P. (2016). Postharvest dip treatment with a natura lysophospholipid plus soy lecithin extended the shelf life of banana fruit. *Postharvest Biology and Technology*, *113*, 58-65.

Alderton, W. K., Cooper, C. E. and Knowles, R. G. (2001). Nitric oxide synthases: structure, function and inhibition. Biochemical Journal, 357(P3): 593 – 615.

Alfaddagh, A., Martin, S. S., Leucker, T. M., Michos, E. D., Blaha, M. J., Lowenstein, C. J., ... & Toth, P. P. (2020). Inflammation and cardiovascular disease: From mechanisms to therapeutics. *American Journal of Preventive Cardiology*, 100130.

Aguilera-Carbo A., Augur C., Prado-Barragan L. A., Favela-Torres E., Aguilar C N. (2008). Microbial production of ellagic acid and biodégradation of ellagitannins. Applied Microbiology and Biotechnology. 78: 189-199.

Alkaitis, M. S., & Crabtree, M. J. (2012). Recoupling the cardiac nitric oxide synthases: tetrahydrobiopterin synthesis and recycling. *Current heart failure reports*, *9*(3), 200-210.

Aktan, F., Henness, S., Roufogalis, B. D. and Ammit, A. J. (2003). Gypenosides derived from Gynostemma pentaphyllum suppress NO synthesis in murine macrophages by inhibiting iNOS enzymatic activity and attenuating NF-B-mediated iNOS protein expression. Nitric Oxide: Biology and Chemistry, 8(4): 235 – 242.

Alp, N. J., Mussa, S., Khoo, J., Cai, S., Guzik, T., Jefferson, A.,. & Channon, K. M. (2003). Tetrahydrobiopterin-dependent preservation of nitric oxide–mediated endothelial function in diabetes by targeted transgenic GTP–cyclohydrolase I overexpression. *The Journal of clinical investigation*, *112*(5), 725-735.

Alsmairat, N., Engelgau, P., & Beaudry, R. (2018). Changes in Free Amino Acid Content in the Flesh and Peel of 'Cavendish'Banana Fruit as Related to Branched-chain Ester Production, Ripening, and Senescence. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *143*(5), 370-380.

Aljanabi, S. M., Forget, L., & Dookun, A. (1999). An improved and rapid protocol for the isolation of polysaccharide-and polyphenol-free sugarcane DNA. *Plant Molecular Biology Reporter*, *17*(3), 281-282.

Alothman, M., Bhat, R., & Karim, A. A. (2009). Antioxidant capacity and phenolic content of selected tropical fruits from Malaysia, extracted with different solvents. *Food Chemistry*, *115*(3), 785-788.

Amarante-Mendes, G. P., Adjemian, S., Branco, L. M., Zanetti, L. C., Weinlich, R., & Bortoluci, K. R. (2018). Pattern recognition receptors and the host cell death molecular machinery. *Frontiers in immunology*, *9*, 2379.

Amin, K. A., & Abd El-Twab, T. M. (2009). Oxidative markers, nitric oxide and homocysteine alteration in hypercholesterolimic rats: role of atorvastatine and cinnamon. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine*, *2*(3), 254.

Amin, M. F., Meidyawati, R., Djamil, M. S., & Latief, B. S. (2019). Inflammatory cytokine serum levels in sockets following extraction of teeth with apical periodontitis. *Journal of International Dental and Medical Research*, *12*(1), 129-132.

Amri, F. S. A., & Hossain, M. A. (2018). Comparison of total phenols, flavonoids and antioxidant potential of local and imported ripe bananas. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, *5*(4), 245-251.

Aguilera-Carbo, A., Augur, C., Prado-Barragan, L. A., Favela-Torres, E., & Aguilar, C. N. (2008). Microbial production of ellagic acid and biodegradation of ellagitannins. *Applied microbiology and biotechnology*, *78*(2), 189-199.

Andrews, P. W., Bharwani, A., Lee, K. R., Fox, M., & Thomson Jr, J. A. (2015). Is serotonin an upper or a downer? The evolution of the serotonergic system and its role in depression and the antidepressant response. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *51*, 164-188.

Andreyev, A. Y., Kushnareva, Y. E., & Starkov, A. A. (2005). Mitochondrial metabolism of reactive oxygen species. *Biochemistry (Moscow)*, *70*(2), 200-214.

Anhwange B.A. (2008). Chemical composition of Musa sapientum (Banana) Peels. Journal of Food Technology, 6, pp.263-266

Anhwange, B. A., Ugye, T. J., & Nyiaatagher, T. D. (2009). Chemical composition of Musa sapientum (banana) peels. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, *8*(6), 437-442.

Ansar, W., & Ghosh, S. (2016). Inflammation and inflammatory diseases, markers, and mediators: Role of CRP in some inflammatory diseases. In *Biology of C Reactive Protein in Health and Disease* (pp. 67-107). Springer, New Delhi.

Anwar, R., Mattoo, A. K., and Handa, A. K. (2015). "Polyamine interactions with plant hormones: crosstalk at several levels," in Polyamines A: Universal Molecular Nexus for Growth, Survival and Specialized Metabolism eds T. Kusano, H. Suzuki (New York, NY: Springer), 267–302.

Apriasari, M. L., Pramitha, S. R., Puspitasari, D., & Ernawati, D. S. (2020). Anti-Inflammatory Effect of Musa acuminata Stem. *European journal of dentistry*, *14*(02), 294-298.

Arango, J., Jourdan, M., Geoffriau, E., Beyer, P., & Welsch, R. (2014). Carotene hydroxylase activity determines the levels of both α-carotene and total carotenoids in orange carrots. *The Plant Cell*, *26*(5), 2223-2233

Arts, M. J. T. J., G. R. M. M. Haenen, H. P. Voss et A. Bast (2004). "Antioxidant capacity of reaction products limits the applicability of the Trolox Equivalent Antioxidant Capacity (TEAC) assay." Food and Chemical Toxicology 42(1): 45-49.

Aurore, G., Parfait, B., & Fahrasmane, L. (2009). Bananas, raw materials for making processed food products. *Trends in Food Science & Technology*, *20*(2), 78-91.

Awika, J. M., Rooney, L. W., Wu, X., Prior, R. L., & Cisneros-Zevallos, L. (2003). Screening methods to measure antioxidant activity of sorghum (*Sorghum bicolor*) and sorghum products. *Journal of agricultural and food chemistry*, *51*(23), 6657-6662.

Babbar, N., Oberoi, H. S., Uppal, D. S., & Patil, R. T. (2011). Total phenolic content and antioxidant capacity of extracts obtained from six important fruit residues. *Food Research International*, *44*(1), 391-396.

Badri, W., Miladi, K., Nazari, Q. A., Greige-Gerges, H., Fessi, H., & Elaissari, A. (2016). Encapsulation of NSAIDs for inflammation management: overview, progress, challenges and prospects. *International journal of pharmaceutics*, *515*(1-2), 757-773.

Baixauli, R., Salvador, A., Martinez-Cervera, S., & Fiszman, S. M. (2008). Distinctive sensory features introduced by resistant starch in baked products. Food Science and Technology, 41, 1927–1933.

Baganz, N. L., & Blakely, R. D. (2013). A dialogue between the immune system and brain, spoken in the language of serotonin. *ACS chemical neuroscience*, *4*(1), 48-63.

Baghurst, K. I., Baghurst, P. A., & Record, S. J. (2001). Dietary fibre, nonstarch polysaccharide and resistant starch intakes in Australia. In G. A. Spiller (Ed.). Handbook of dietary fibre in human health (pp. 583–591). Boca Raton, FL: CRC Press.

Bakry, F., Haicour, R., Horry, J. P., Megia, R., & Rossignol, L. (1993). Applications of biotechnologies to banana breeding: haplogenesis, plant regeneration from protoplasts, and transformation. *Proceedings of the Work. Biotechnol. Appl. Banan. plantain Impro*, 52-62.

Bakry Frédéric, Carreel Françoise, Caruana Marie-Line, Côte François-Xavier, Jenny Christophe, Tézenas Du Montcel Hugues. (2007). Les bananiers. In : *L'amélioration des plantes tropicales*.

Bakry, F., De La Reberdiere, N. P., Pichot, S., & Jenny, C. (2007). In liquid medium colchicine treatment induces non chimerical doubled-diploids in a wide range of mono-and interspecific diploid banana clones. *Fruits*, *62*(1), 3-12.

Balkwill, F., & Mantovani, A. (2001). Inflammation and cancer: back to Virchow?. *The lancet*, *357*(9255), 539-545.

Baraket, A., Lee, M., Zine, N., Sigaud, M., Bausells, J., & Errachid, A. (2017). A fully integrated electrochemical biosensor platform fabrication process for cytokines detection. *Biosensors and Bioelectronics*, *93*, 170-175.

Blank, U., & Vitte, J. (2015). Les médiateurs du mastocyte. *Revue Française d'Allergologie*, *55*(1), 31-38.

Balasundram, N., Sundram, K., & Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food chemistry*, *99*(1), 191-203.

Baldi, A., Pandit, M. K., & Ranka, P. (2012). Amelioration of in-vivo Antioxidant Activity by Banana Extracts. *International Journal of Pharmaceutical & Biological Archive*, *3*(1), 157-161.

Bannwarth, B. (2000). Gastrointestinal tolerance of nonsteroidal anti-inflammatory agents. *Drugs*, *59*, 17-23.

Bapat V.A., Trivedi P.K., Ghosh A., Sane V.A., Ganapathi T.R., Nath P. Ripening of fleshy fruit: molecular insight and the role of ethylene Biotechnol. Adv., 28 (2010), pp. 94-107

Barton, G. M. (2008). A calculated response: control of inflammation by the innate immune system. *The Journal of clinical investigation*, *118*(2), 413-420.

Baudin, B. (2006). Stress oxydant et pathologies cardiovasculaires. *mt cardio*, *2*(1), 43-52.

Becker DE. (2013). Basic and clinical pharmacology of glucocorticosteroids. Anesthesia Progress. 60(1):25—32.

Belaïch, R. and Boujraf, S. (2016). Facteurs inflammatoires et stress oxydant chez les hémodialysés : effets et stratégies thérapeutiques. Médecine des Maladies Métaboliques, 10(1), pp.38-42.

Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., Sánchez-Hernández, L., & Paredes-López, O. (1999). Isolation and partial characterization of banana starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *47*(3), 854-857.

Benzie, I. F. F. et J. J. Strain (1996). "The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of 'antioxidant power': The FRAP assay." Analytical Biochemistry 239(1): 70-76.

Bertolini, A. (Ed.). (2009). *Starches: characterization, properties, and applications*. CRC Press.

Best, R., Lewis, D. A., & Nasser, N. (1984). The anti-ulcerogenic activity of the unripe plantain banana (Musa species). *British journal of pharmacology*, *82*(1), 107.

Bhaskar JJ, Shobha MS, Sambaiah K, Salimath PV. Beneficial effects of banana (Musa sp. var. elakki bale) flower and pseudostem on hyperglycemia and advanced glycation end-products (AGEs) in streptozotocin-induced diabetic rats. J Physiol Biochem. 2011;67(3):415–25

Bico, S. L. S., Raposo, M. F. J., Morais, R. M. S. C., Morais, A. M. M. B. 2009. Combined effects of chemical dip and/or carrageenan coating and/or controlled atmosphere on quality of fresh-cut banana. Food control. Volume: 20, Issue:5, Pages:508-514

Blache, D. et M. Prost (1992). "Free radical attack: Biological test for human resistance capability. In Proceedings of the IX College Park Colloquium on Chemical Evolution: A Lunar-Based Chemical Analysis Laboratory (LBCAL 1989).": pp. 82-98.

Boots A.W., Haenen G.R., Bast A. Health effects of quercetin (2008). From antioxidant to nutraceutical European Journal Pharmacology, 585 (2–3),pp. 325-337

Bordt, E. A., & Polster, B. M. (2014). NADPH oxidase-and mitochondria-derived reactive oxygen species in proinflammatory microglial activation: a bipartisan affair?. *Free Radical Biology and Medicine*, *76*, 34-46.

Bori, M.O., Adebusoye, S. A., Lawal, A. K., and Awotiwon, A., (2007). Production of biogas from banana and plantain peels. Advanced Environmental Biology 1: 33-38.

Borges, C. V., Minatel, I. O., Amorim, E. P., Belin, M. A. F., Gomez-Gomez, H. A., Correa, C. R., & Lima, G. P. P. (2019). Ripening and cooking processes influence the carotenoid content in bananas and plantains (Musa spp.). *Food Research International*, *124*, 129-136.

Borges, C. V., Belin, M. A. F., Amorim, E. P., Minatel, I. O., Monteiro, G. C., Gomez, H. A. G., & Lima, G. P. P. (2019). Bioactive amines changes during the ripening and thermal processes of bananas and plantains. *Food Chemistry*, 125020.

Bouhris, S., Sissaoui, I., Soufane, M., & Boutennoun, H. E. (2017). *Activité antioxydante des polyphénols extraits de deux plantes médicinales de Jijel* (Doctoral dissertation, Université de Jijel).

Bourbon A, Vionnet M, Leprince P, Vaissier E, Copeland J, McDonagh P, Debre P, Gandjbakhch I.(2004). The effect of methylprednisolone treatment on the cardiopulmonary bypassinduced systemic inflammatory response. European journal of cardio-thoracic surgery. 26(5):932—938.

BPS (2017). Statistics Indonesia Produksi Tanaman Hortikultura Badan Pusat Statistik (BPS) https://www.bps.go.id/ Google Scholar

Brady C.J. (1987). Fruit ripening. Annu. Rev. Plant Physiol., 38, 155-178

Brand-Williams, W., M. E. Cuvelier et C. Berset (1995). "Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity." LWT - Food Science and Technology 28(1): 25-30

Brunelle, J. K., Bell, E. L., Quesada, N. M., Vercauteren, K., Tiranti, V., Zeviani, M. & Chandel, N. S. (2005). Oxygen sensing requires mitochondrial ROS but not oxidative phosphorylation. *Cell metabolism*, *1*(6), 409-414.

Bruneton J. (2008). Acides phénols. In: Pharmacognosie, phytochimie et plantes médicinales. Ed: Tec & Doc. Lavoisier, Paris. pp 198-260.

Bruyne T., Pieters L., Deelstra H. et Vlietink A. (1999). Condensed vegetable tannins: Biodiversity in structure and biological activities. Biochemical Systematic and Ecology. 27: 445459.

Bruno Bonnet, C. (2012). *Valorisation de la banane Cavendish FWI pour l'obtention de molécules d'intérêts biologiques* (Doctoral dissertation, Antilles-Guyane).

Bugaud, C., Chillet, M., Beauté, M. P., & Dubois, C. (2006). Physicochemical analysis of mountain bananas from the French West Indies. *Scientia Horticulturae*, *108*(2), 167-172.

Bugaud, C., Alter, P., Daribo, M. O., & Brillouet, J. M. (2009). Comparison of the physico-chemical characteristics of a new triploid banana hybrid, FLHORBAN 920, and the Cavendish variety. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *89*(3), 407-413.

Bursch, W. (2020). Cell death by apoptosis: Significance for regulation of homeostasis of cell number and its disturbance during cancer development. *Growth Regulation and Carcinogenesis*, *2*.

Cao, G., & Prior, R. L. (1998). Comparison of different analytical methods for assessing total antioxidant capacity of human serum. *Clinical chemistry*, *44*(6), 1309-1315.

Capet, C., Bentot, C., Druesne, L., Chassagne, P. H., & Doucet, J. (2001). Les effets indésirables des anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS) chez le sujet âgé. *La Revue de gériatrie*, *26*(5), 379-384.

Carneiro R.P., Oliveira F.A.S., Madureira F.D., Silva G., de Souza W.R., Lopes R.P. (2013). Development and method validation for determination of 128 pesticides in bananas by modified QuEChERS and UHPLC-MS/MS analysis Food Control, 33, pp. 413-423

Carpentier, S. C., Witters, E., Laukens, K., Deckers, P., Swennen, R., & Panis, B.(2005). Preparation of protein extracts from recalcitrant plant tissues: an evaluation of different methods for two-dimensional gel electrophoresis analysis. *Proteomics*, *5*(10), 2497-2507

Cassettari, V. M. G., Machado, N. C., de Arruda Lourenção, P. L. T., Carvalho, M. A., & Ortolan, E. V. P. (2019). Combinations of laxatives and green banana biomass on the treatment of functional constipation in children and adolescents: a randomized study. *Jornal de Pediatria (Versão em Português)*, *95*(1), 27-33.

Castañeda-Ovando, A., de Lourdes Pacheco-Hernández, M., Páez-Hernández, M. E., Rodríguez, J. A., & Galán-Vidal, C. A. (2009). Chemical studies of anthocyanins: A review. *Food chemistry*, *113*(4), 859-871.

Cenac, N., Altier, C., Motta, J. P., Galeano, S., Zamponi, G., & Vergnolle, N. (2009). CO. 24 L'histamine et la sérotonine sensibilisent TRPV4 (Transient Receptor Potential Vanilloid 4) provoquant une hyperalgésie et une allodynie viscérales. *Gastroentérologie Clinique et Biologique*, *33*(3), A12.

Chabi, M. C., Dassou, A. G., Dossou-Aminon, I., Ogouchoro, D., Aman, B. O., & Dansi, A. (2018). Banana and plantain production systems in Benin: ethnobotanical investigation, varietal diversity, pests, and implications for better production. *Journal of ethnobiology and ethnomedicine*, *14*(1), 78.

Champion, J. (1963). Le bananier. Paris, Maisonneuve et Larose, 264p.

Chan, D. C. (2012). Fusion and fission: interlinked processes critical for mitochondrial health. *Annual review of genetics*, *46*, 265-287.

Chandrasekhar, J., Madhusudhan, M. C., & Raghavarao, K. S. M. S. (2012). Extraction of anthocyanins from red cabbage and purification using adsorption. *Food and bioproducts processing*, *90*(4), 615-623

Chang T-M. Tyrosinase and Tyrosinase Inhibitors. (2012). J Biocatal Biotransformation [Internet].01(02). Available from: http://www.scitechnol.com/2324-9099/2324- 9099-1-e106.php

Chavant, A., Gautier-Veyret, E., Chhun, S., Guilhaumou, R., & Stanke-Labesque, F. (2020). Pharmacokinetic changes related to acute infection. Examples from the SARS-CoV-2 pandemic. *Therapie*.

Cheesman, E. E. (1947). Classification of the Bananas: The Genus Musa L. *Kew Bulletin*, 106-117.

Chen, G. L., Chen, S. G., Zhao, Y. Y., Luo, C. X., Li, J., & Gao, Y. Q. (2014). Total phenolic contents of 33 fruits and their antioxidant capacities before and after in vitro digestion. *Industrial Crops and Products*, *57*, 150-157.

Chen, L., Hu, J. Y., & Wang, S. Q. (2012). The role of antioxidants in photoprotection: a critical review. *Journal of the American Academy of Dermatology*, *67*(5), 1013-1024.

Chen, A. F., Du, Y. H., Galligan, J. J., Fink, G. D., Alp, N. J., & Channon, K. M. (2005). Endothelial-specific GTP cyclohydrolase I overexpression prevents blood pressure progression in salt-sensitive hypertension.

Chen, H., Detmer, S. A., Ewald, A. J., Griffin, E. E., Fraser, S. E., & Chan, D. C. (2003). Mitofusins Mfn1 and Mfn2 coordinately regulate mitochondrial fusion and are essential for embryonic development. *The Journal of cell biology*, *160*(2), 189-200.

Chew, K. K., Khoo, M. Z., Ng, S. Y., Thoo, Y. Y., Aida, W. W., & Ho, C. W. (2011). Effect of ethanol concentration, extraction time and extraction temperature on the recovery of phenolic compounds and antioxidant capacity of Orthosiphon stamineus extracts. *International Food Research Journal*, *18*(4), 1427.

Chillet M., de Lapeyre de Bellaire L. (2002).Variability of bulk ethylene production in bananas from the French West Indies Sci.Hortic.,96, p.127-137

Chillet, M., Hubert, O., & de Bellaire, L. D. L. (2007). Relationship between physiological age, ripening and susceptibility of banana to wound anthracnose. *Crop Protection*, *26*(7), 1078-1082.

Chira, K., Suh, J. H., Saucier, C., & Teissèdre, P. L. (2008). Les polyphénols du raisin. *Phytothérapie*, *6*(2), 75-82.

Choe, E., & Min, D. B. (2005). Chemistry and reactions of reactive oxygen species in foods. *Journal of food science*, *70*(9), R142-R159.

Cillard, J., & Cillard, P. (2006). Mécanismes de la peroxydation lipidique et des anti-oxydations. *Oleagineux, corps gras, lipides*, *13*(1), 24-29.

Claudine Valérie Passo Tsamo, Marie-France Herent, Kodjo Tomekpe, Thomas Happi Emaga, Joëlle Quetin-Leclercq, Hervé Rogez, Yvan Larondelle, Christelle Andre. (2015). Phenolic profiling in the pulp and peel of nine plantain cultivars (Musa sp.), Food Chemistry,Volume 167, pages 197-204

Cohen, S. S. (1998). A Guide to the Polyamines. New York, NY: Oxford University Press.

Cohen Y., Jacquot C. (2008). Anti-Inflammatory. Pharmacology (6th Edition), Elsevier Masson, pages 324-342

Cordenunsi, B. R., and Lajolo, F. M. (1995). Starch breakdown during banana ripening: sucrose synthase and sucrose phosphate synthase. J. Agric. Food Chem. 43, 347–351.

Coutinho AE, Chapman KE (2011). The anti-inflammatory and immunosuppressive effects of glucocorticoids, recent developments and mechanistic insights. Molecular and Cellular Endocrinology. 335(1):2—13.

Cowan, M. M. (1999). Plant products as antimicrobial agents. Clinical microbioloy reviews.12 (4): 564-570.

Chien, R. C., Lin, L. M., Chang, Y. H., Lin, Y. C., Wu, P. H., Asatiani, M. D., ... & Mau, J. L. (2016). Anti-inflammation properties of fruiting bodies and submerged cultured mycelia of culinary-medicinal higher Basidiomycetes mushrooms. *International journal of medicinal mushrooms*, *18*(11).

Chira, K., Suh, J. H., Saucier, C., & Teissèdre, P. L. (2008). Les polyphénols du raisin. *Phytothérapie*, *6*(2), 75-82.

Číž, M., Čížová, H., Denev, P., Kratchanova, M., Slavov, A., & Lojek, A. (2010). Different methods for control and comparison of the antioxidant properties of vegetables. *Food Control*, *21*(4), 518-523.

Crozier A. (2003). Classification and biosynthesis of secondary plant products: an overview. In Plants" Diet and Health". Ed. Goldberg. pp: 27- 48.

D Archivio, M., Filesi, C., Di Benedetto, R., Gargiulo, R., Giovannini, C., & Masella, R. (2007). Polyphenols, dietary sources and bioavailability. *Annali-Istituto Superiore di Sanita*, *43*(4), 348.

Daboul, M. W. (2013). Toward an approach for cutaneous leishmania treatment. *Our Dermatology Online*, *4*(1), 46.

Dai, D. F., Chiao, Y. A., Marcinek, D. J., Szeto, H. H., & Rabinovitch, P. S. (2014). Mitochondrial oxidative stress in aging and healthspan. Longev. Heal. 3, 6.

Danièle, C.(2012). Prise en charge des syndromes inflammatoires inexpliqués en médecine générale: enquête pratique auprès de 80 généralistes de Haute-Savoie. Thèse pour l'obtention de doctorat en médecine 2012.

Danielson, M., Reinsfelt, B., Westerlind, A., Zetterberg, H., Blennow, K., & Ricksten, S. E. (2018). Effects of methylprednisolone on blood-brain barrier and cerebral inflammation in cardiac surgery—a randomized trial. *Journal of neuroinflammation*, *15*(1), 1-9.

da Mota, R. V., Lajolo, F. M., Cordenunsi, B. R., & Ciacco, C. (2000). Composition and functional properties of banana flour from different varieties. *Starch-Stärke*, *52*(2-3), 63-68.

De Paz-Sánchez, M. (2014). "Plantain of Guinea". The Atlantic Adventure of Banana.

de Vasconcelos Facundo, H. V., dos Santos Garruti, D., dos Santos Dias, C. T., Cordenunsi, B. R., & Lajolo, F. M. (2012). Influence of different banana cultivars on volatile compounds during ripening in cold storage. *Food Research International*, *49*(2), 626-633.

Debydupont, G., Deby, C. and Lamy, M. (2002). Données actuelles sur la toxicité de l'oxygène: Current data on the toxicity of oxygen. Réanimation, 11(1), pp.28-39.

Denham TP., Haberle SG. Lentfer C., Fullagar R., Field J., Therin M., Porch N., Winsborough B (2003). Origin of agriculture in the Kuk Marshes in the highlands of New Guinea Science, 301, p.189-193

Del Río, L. A. (2015). ROS and RNS in plant physiology: an overview. *Journal of Experimental Botany*, *66*(10), 2827-2837.

Delattre, J., J.-L. Beaudeux et D. Bonnefont- Rousselot (2005). "Radicaux libres et stress oxydant, Aspects biologiques et pathologiques." 87-108.

Derbel S., Ghedira K. (2005). Phytothérapie et nutrition: Les phytonutriments et leur impact sur la santé. Phytothérapie. 1: 28-34.

Dinarello, C. A. (2010). Anti-inflammatory agents: present and future. *Cell*, *140*(6), 935-950

Dinh-Xuan, A. T., Annesi-Maesano, I., Berger, P., Chambellan, A., Chanez, P., Chinet, T., ... & Roche, N. (2015). Contribution of exhaled nitric oxide measurement in airway inflammation assessment in asthma. A position paper from the French Speaking Respiratory Society. *Revue des Maladies Respiratoires*, *32*(2), 193-215.

Djeridane, A., Yousfi, M., Nadjemi, B., Maamri, S., Djireb, F., & Stocker, P. (2006). Extraits phénoliques de diverses plantes algériennes comme inhibiteurs puissants de la carboxylestérase hépatique porcine. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry , 21* (6), 719-726.

Druzynka B., Stepniewska A. and R. Wolosiak. (2007). The Influence of Time and Type of Solvent on Efficiency of The Extraction of Polyphenols from Green Tea and Antioxidant Properties Obtained Extracts. Acta Sci. Pol., Tecnol. Aliment., vol. 6, no. 2, pp. 29–40

Do Nascimento J.R.O. et al., 2006. Beta-amylase expression and starch degradation during banana ripening. Postharvest Biol. Technol., 40, 41-47.

Dormond H, Boschini C, Rojas A. (1998a). Effect of two levels of ripe banana peel on milk production by dairy cattle, Agron Costarricense, 1998a, 22, 43-49.

Dormond H, Boschini C, Zuniga AM. (1998b). Effect of four levels of ripe banana peel on rumen degradability of dry matters from Kikuyo grass (Pennnisetum clandestinum) and African Star grass (Cynodon nlemfluensis) in Jersey cows, Agron Costarricense, 1998b, 22, 163-172

Dorn, G. W., Clark, C. F., Eschenbacher, W. H., Kang, M. Y., Engelhard, J. T., Warner, S. J., ... & Jowdy, C. C. (2011). MARF and Opa1 control mitochondrial and cardiac function in Drosophila. *Circulation research*, *108*(1), 12-17.

DSRP. Document de Stratégie de Réduction de la Pauvreté Province du Sud-Kivu République Démocratique du Congo Ministère du Plan. Unité de pilotage de processus du DSRP Kinshasa (2005) 96 p

Du B, Zhu F, Xu B. An insight into the anti-inflammatory properties of edible and medicinal mushrooms (2018). Journal of Functional Foods. 47: 334–342.

Dvorakova, M., & Landa, P. (2017). Anti-inflammatory activity of natural stilbenoids: A review. *Pharmacological Research*, *124*, 126-145.

Ehiowemwenguan, G., Emoghene, A O., and Inetianbo, R J E. (2014). Antibacterial and phytochemical analysis of Banana fruit peel, Journal of Pharmacy, 4 (8), 18-25.

Emaga, H T., Wathelet, B., & Paquot, M. (2008). Textural and biochemical changes in banana fruits during ripening. Their influence on the preservation of the quality of the fruit and the control of ripening. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*,*12*(1), 89-98.

Emaga HT , Andrianaivo RH, Wathelet B, Tchango JT, Paquot M. (2007). Effects of the stage of maturation and varieties on the chemical composition of banana and plantain peels. Food Chem. ;103(2):590–600.

Englberger L, Aalbersberg W, Ravi P, Bonnin E, Marks GC, Fitzgerald MH, Elymore J. (2003). Further analyses on Micronesian banana, taro, breadfruit and other foods for provitamin A carotenoids and minerals. J Food Comp Anal 16:219 236.

Erdogan, B., Is, M., Aker, F. V., Emon, S. T., Engin, T., Akar, E. A., ... & Somay, H. (2019). Preventative effect of diclofenac sodium and/or diltiazem in rats with epidural fibrosis. *Bratislavske lekarske listy*, *120*(11), 813-818.

Eversley, T. C. (2012). Le potentiel antioxydant de l'alimentation tel qu'estimé par le score ORAC: une comparaison des apports des personnes âgées avec démence du type Alzheimer avec ceux des témoins sans problèmes cognitifs.

Fabre, A., & Crestani, B. (2004). 9 CPP [publication électronique exclusive] Rôle de la sérotonine dans la physiopathologie de la fibrose pulmonaire. *Revue des Maladies Respiratoires*, *21*(2), 428.

FAO (1991). Racines, tubercules, plantains et bananas dans la nutrition humaine. Collection FAO Nutrition 24.

FAOSTAT Statistics Database (2009). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Agriculture, Rome, Italy.

FAOSTAT Statistics Database (2012). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Agriculture, Rome, Italy.

FAOSTAT Statistics Database (2013). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Agriculture, Rome, Italy.

FAO, 2014. Etude marché de la banane et Statistiques de la banane 2012-2013. Rome, Italie

FAOSTAT (2017). Statistiques FAOSTAT FAO. http://www.fao.org/faostat/ Google Scholar

FAOSTAD (2018). Food and agriculture organization of the united Nations Food Agric. Data

Farhat, F. (2015). *Fonction mitochondriale et espèces réactives dérivées de l'oxygène: effets du genre et de l'entraînement en endurance chez le rat Wistar et l'anguille européenne* (Doctoral dissertation, Université de Bretagne occidentale-Brest).

Favier A. (2003). Le stress oxydant : Intérêt conceptuel et expérimental dans la compréhension des mécanismes des maladies et potentiel thérapeutique, l'actualité chimique, P 108- 115.

Feldman JM, Lee EM. (1985). Serotonin content of foods: effect on urinary excretion of 5-hydroxyindoleacetic acid. Am J Clin Nutr. 42(4):639–43.

Fernanda H.G. Peroni-Okita, A. Patrick Gunning, Andrew Kirby, Renata A. Simão, Claudinéia A. Soares, Beatriz R. Cordenunsi,Visualization of internal structure of banana starch granule through AFM, Carbohydrate Polymers, Volume 128, 2015, Pages 32-40, ISSN 0144-8617

Fernandes K.M., Carvalho V.D., Cal-Vidal J. (1979). Physical changes during ripening of silver banana Journal of Food Science, 44 (4), pp.1254-1255

Filik, H., & Avan, A. A. (2020). Electrochemical immunosensors for the detection of cytokine tumor necrosis factor alpha: A review. *Talanta*, *211*, 120758.

Floegel, A., Kim, D. O., Chung, S. J., Koo, S. I., & Chun, O. K. (2011). Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods. *Journal of food composition and analysis*, *24*(7), 1043-1048.

Fontaine, E., Barnoud, D., Schwebel, C. and Leverve, X. (2002). Place des antioxydants dans la nutrition du patient septique: Antioxidants in critically ill patients. Réanimation, 11(6), PP.411-420.

Fougerat, A., Gayral, S., Malet, N., Briand-Mesange, F., Breton-Douillon, M., & Laffargue, M. (2009). Phosphoinositide 3-kinases and their role in inflammation: potential clinical targets in atherosclerosis?. *Clinical Science*, *116*(11), 791-804.

Frankel, E. N., & Meyer, A. S. (2000). The problems of using one-dimensional methods to evaluate multifunctional food and biological antioxidants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *80*(13), 1925-1941.

Fu, X., Cheng, S., Feng, C., Kang, M., Huang, B., Jiang, Y., ... & Yang, Z. (2019). Lycopene cyclases determine high α-/β-carotene ratio and increased carotenoids in bananas ripening at high temperatures. *Food chemistry*, *283*, 131-140.

Fungo, R., & Pillay, M. (2011). β-Carotene content of selected banana genotypes from Uganda. *African Journal of Biotechnology*,*10*(28), 5423-5430.

Furet, Y., Metman, E. H., Breteau, M., & Bertrand, J. (1987, December). Hepatitis due to non steroidal anti-inflammatory agents. In *Annales de gastroenterologie et d'hepatologie* (Vol. 23, No. 7, pp. 367-374).

Gambini, J. et Granier, R. (2013). Effets indésirables des rayons X. EMC - Radiologie et Imagerie Médicale: Principes et techniques – Radioprotection: 1-20.

Gamage, T. V., & Rahman, M. S. (1999). Postharvest handling of foods of plant origin. *FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY-NEW YORK-MARCEL DEKKER-*, 11-46.

Garcia-Valle, D. E., Bello-Perez, L. A., Flores-Silva, P. C., Agama-Acevedo, E., & Tovar, J. (2019). Extruded unripe plantain flour as an indigestible carbohydrate-rich ingredient. *Frontiers in nutrition*, *6*, 2.

Gardes-Albert, M., Bonnetfont-Rousselot, D., Abedinzadeh, Z., Jore, D. (2003). Espèces réactives de l'oxygène: Comment l'oxygène peut-il devenir toxique? L'actualité chimique, n°277-278, p 57- 64.

Garone, C., Minczuk, M., Tilokani, L., Nagashima, S., Paupe, V., & Prudent, J. (2018). Mitochondrial dynamics: overview of molecular mechanisms. *Essays in biochemistry*, *62*(3), 341-360.

Gate, L., Paul, J., Ba, G. N., Tew, K. D., & Tapiero, H. (1999). Oxidative stress induced in pathologies: the role of antioxidants. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *53*(4), 169-180.

Ghag, S. B., & Ganapathi, T. R. (2017). Genetically modified bananas: To mitigate food security concerns. *Scientia Horticulturae*, *214*, 91-98.

Ghedira K. (2005). Les flavonoïdes: structures, propriétés biologiques, rôles prophylactiques et emplois en thérapeutique. Phytothérapie. 04: 162-169.

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.

González-Montelongo, R., Lobo, M. G., & González, M. (2010). The effect of extraction temperature, time and number of steps on the antioxidant capacity of methanolic banana peel extracts. *Separation and Purification Technology*, *71*(3), 347-355.

Grandin M (2013). Les anti-inflammatoires non stéroïdiens, utilisation et conseils dans la pratique officinale quotidienne. Document étayé par une analyse d'ordonnances d'une pharmacie rurale. Thèse de pharmacie, Université d'Angers, France. 116 p

Grierson D., Tucker G.A. & Robertson N.G., (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, 149160.

Guedira, A., Rammah, A., Triqui, Z. E., Chlyah, H., Chlyah, B., & Haicour, R. (2004). Evaluation of the resistance to two nematodes: Radopholus similis and Meloidogyne spp. in four banana genotypes in Morocco. *Comptes rendus biologies*, *327*(8), 745-751.

Guignard J.L. (2000). Les composés aromatiques In : Biochimie végétal. Ed : Dunod. pp : 161-217.

Gunaseelan, N. (2004). Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. Biomass and Bioenergy 26: 389-399.

Guo L., Ma R., Sun H., Raza A., Tang J., Li Z. (2018). Activités anti-inflammatoires et mécanisme associé des polysaccharides isolés de *Sargentodoxa cuneata*. Chem. biodiversity. 15. 8p

Haleng, J., Pincemail, J., Defraigne, J. O., Charlier, C., & Chapelle, J. P. (2007). Le stress oxydant. *Revue médicale de Liège*, *62*(10), 628-38.

Hanada T. and Yoshimura A. (2002). Regulation of cytokine signaling and inflammation. Cytokine Growth Factor Rev 13, 413-21.

Han X.H., Hong S.S., Hwang J.S., Lee M.K., Hwang B.Y., Ro J.S. (2007). Monoamine oxidase inhibitory components from Cayratia japonica. Archives Pharmacal Research. 30: 0713.

Vu, H. T., Scarlett, C. J., & Vuong, Q. V. (2018). Phenolic compounds within banana peel and their potential uses: A review. *Journal of Functional Foods*, *40*, 238-248.

Handa, A. K., Fatima, T., & Mattoo, A. K. (2018). Polyamines: bio-molecules with diverse functions in plant and human health and disease. *Frontiers in chemistry*, *6*, 10.

Hardisson A, Rubio C, Baez A, Martin M, Alvarez R, Diaz E. (2001). Mineral composition of the banana (Musa acuminata) from the island of Tenerife. Food Chem. 73(2):153–61.

Harman, D. (2002). Aging: a theory based on free radical and radiation chemistry. *Science's SAGE KE*, *2002*(37), 14.

Harirforoosh, S., Asghar, W., & Jamali, F. (2013). Adverse effects of nonsteroidal antiinflammatory drugs: an update of gastrointestinal, cardiovascular and renal complications. *Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*, *16*(5), 821-847.

Haslinda, W. H., Cheng, L. H., Chong, L. C., & Aziah, A. N. (2009). Chemical composition and physicochemical properties of green banana (Musa acuminata× balbisiana Colla cv. Awak) flour. *International journal of food sciences and nutrition*, *60*(sup4), 232-239.

Hassan, G. S., Hegazy, G. H., Ibrahim, N. M., & Fahim, S. H. (2019). New ibuprofen derivatives as H2S and NO donors as safer anti-inflammatory agents. *Future medicinal chemistry*, *11*(23), 3029-3045.

Hattori, Y., Hattori, S., Wang, X., Satoh, H., Nakanishi, N., & Kasai, K. (2007). Oral administration of tetrahydrobiopterin slows the progression of atherosclerosis in apolipoprotein E-knockout mice. *Arteriosclerosis, thrombosis, and vascular biology*, *27*(4), 865-870.

He Z., Xia W. et Chen J. (2008). Isolation and structure elucidation of phénolics compounds in Chinese olive (Cnarium album L.) fruit. European Food Research and Technology. 226: 1191-1196.

Heslop-Harrison JS, Schwarzacher T. (2007). Domestication, génomique et avenir de la banane. Ann. Bot.,100, p.1 073-1 084

Henderson, R. W., Morton, R. K., and Rawlison, W. A. (1959). Oligosaccharide synthesis in the banana and its relationship to the transferase activity of invertase. Biochem. J. 72, 340–344

Hennebelle, T. (2006). "Investigation chimique, chimiotaxonomique et pharmacologique de Lamiales productrices d'antioxydants." Chimie Organique et Macromoléculaire Docotrat: 303.

Hertog M.G.L., Hollman P.C.H, Van de Putte B. (1993). Content of potentially anticarcinogenic flavonoids of tea infusions, wines, and fruit juices. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 41: 1242-1246.

Hill, S. A., and ap Rees, T. (1993). Fluxes of carbohydrate metabolism in ripening bananas. Planta 192, 52–60.

Hirano, T., & Murakami, M. (2020). COVID-19: a new virus, but a familiar receptor and cytokine release syndrome. *Immunity*, *52*(5), 731-733.

Hoffmann, K., Nagel, A. J., Tanabe, K., Fuchs, J., Dehlke, K., Ghamarnejad, O., ... & Mehrabi, A. (2020). Markers of liver regeneration—the role of growth factors and cytokines: a systematic review. *BMC surgery*, *20*(1), 31.

Honzel, D., S. G. Carter, K. A. Redman, A. G. Schauss, J. R. Endres et G. S. Jensen (2008). "Comparison of chemical and cell-based antioxidant methods for evaluation of foods and natural products: Generating multifaceted data by parallel testing using erythrocytes and polymorphonuclear cells." Journal of Agricultural and Food Chemistry 56(18): 8319-8325.

Horie, K., Hossain, M. S., Morita, S., Kim, Y., Yamatsu, A., Watanabe, Y., ... & Kim, M. (2020). The potency of a novel fermented unripe banana powder as a functional immunostimulatory food ingredient. *Journal of Functional Foods*, *70*, 103980.

Hortelano, S. (2009). Molecular basis of the anti-inflammatory effects of terpenoids. *Inflammation & Allergy-Drug Targets (Formerly Current Drug Targets-Inflammation & Allergy)(Discontinued)*, *8*(1), 28-39.

Hou, C., Chen, L., Yang, L., & Ji, X. (2020). An insight into anti-inflammatory effects of natural polysaccharides. *International journal of biological macromolecules*, *153*, 248-255.

Hu W, Yang H, Tie W, Yan Y, Ding Z, Liu Y, Wu C, Wang J, Reiter RJ, Tan DX, Shi H, Xu B, Jin Z. (2017). Natural Variation in Banana Varieties Highlights the Role of Melatonin in Postharvest Ripening and Quality. J Agric Food Chem. 65 (46): 9987-9994.

Huang D.-W., Shen S.-C. (2012). Caffeic acid and cinnamic acid ameliorate glucose metabolism via modulating glycogenesis and gluconeogenesis in insulin-resistant mouse hepatocytes. Journal of Functional Foods, 4(1) pp.358-366

Huet, O., Choukroun, G., & Mira, J. P. (2004). Récepteurs de type Toll, réponse inflammatoire et sepsis. *Réanimation*, *13*(3), 167-175.

Hurabielle, M., & Paris, M. (1981). *Abrégé de matière médicale, pharmacognosie*. Masson.

Illescas, O., Pacheco-Fernández, T., Laclette, J. P., Rodriguez, T., & Rodriguez-Sosa, M. (2020). Immune modulation by the macrophage migration inhibitory factor (MIF) family: D-dopachrome tautomerase (DDT) is not (always) a backup system. *Cytokine*, 155121.

Ishihara, N., Eura, Y., & Mihara, K. (2004). Mitofusin 1 and 2 play distinct roles in mitochondrial fusion reactions via GTPase activity. *Journal of cell science*, *117*(26), 6535-6546.

Inaba, A., X. Liu, N. Yokotani, M. Yamane, W.-J. Lu, R. Nakano, and Y. Kubo. (2007). Differential feedback regulation of ethylene biosynthesis in pulp and peel tissues of banana fruit. J. Expt. Bot. 58:1047–1057.

Iwasawa, H., & Yamazaki, M. (2009). Differences in biological response modifier-like activities according to the strain and maturity of bananas. *Food science and technology research*, *15*(3), 275-282.

ITC. (2018). Rapport d'activités sur la chaine de valeur agricole.

Itelima, J., Onwuliri, F., Onwuliri, E., Onyimba, I., and Oforji, S.(2013). BioEthanol Production from Banana, Plantain and Pineapple Peels by Simultaneous Saccharification and Fermentation Process, International Journal of Environmental Science and Development, 4,(2),213-216.

Jackman R.L. & Stanley D.W., (1995). Perspectives in the textural evaluation of plant foods. Trends Food Sci. Technol., 6, 187-194.

Jamet, A., Botturi, K., Diquet, B., & Mollimard, M. (2006). Histamine: le rôle du médiateur. *Revue française d'allergologie et d'immunologie clinique*, *46*(5), 474-479.

Jastroch, M., Divakaruni, A.S., Mookerjee, S., Treberg, J.R., and Brand, M.D. (2010). Mitochondrial proton and electron leaks. Essays Biochem. 47, 53–67.

Ji, L. and G. Srzednicki. (2015). Extraction of aromatic compounds from banana peels. Acta Hort. 1088:541–546.

Johnson G.I., Sharp J.L. & Oosthuyse S.A., 1997. Postharvest technology and quarantine treatments. In: Litz R.E., ed. The mango: botany, production and uses. Wallingford, UK: CAB International, 447-507.

Jones D.R., 2000. *Diseases of banana, abaca and enset*. Wallingford, UK: Cabi Publishing.

Joselin, A. P., Hewitt, S. J., Callaghan, S. M., Kim, R. H., Chung, Y. H., Mak, T. W., ... & Park, D. S. (2012). ROS-dependent regulation of Parkin and DJ-1 localization during oxidative stress in neurons. *Human molecular genetics*, *21*(22), 4888-4903.

Jourd'heuil, D., Kang, D., & Grisham, M. B. (1997). Interactions between superoxide and nitric oxide: implications in DNA damage and mutagenesis. *Front Biosci*, *2*, 189-196.

Jullien A, Chillet M and Malezieux E. (2008). Pre-harvest growth and development, measured as accumulated degree days, determine the post-harvest green life of banana fruit. J. Hortic. Sci. Biotechnol. 83:506-512

Kahraman, A., & Inal, M. E. (2002). Protective effects of quercetin on ultraviolet A light-induced oxidative stress in the blood of rat. *Journal of Applied Toxicology: An International Journal*, *22*(5), 303-309.

Kanazawa, K., & Sakakibara, H. (2000). High content of dopamine, a strong antioxidant, in cavendish banana. *Journal of agricultural and food chemistry*, *48*(3), 844-848.

Kang, J., Z. Li, T. Wu, G. S. Jensen, A. G. Schauss et X. Wu (2010). "Anti-oxidant capacities of flavonoid compounds isolated from acai pulp (Euterpe oleracea Mart.)." Food Chemistry 122(3): 610-617.

Katiyar, S. K., Matsui, M. S., Elmets, C. A., & Mukhtar, H. (1999). Polyphenolic Antioxidant (-)-Epigallocatechin-3-Gallate from Green Tea Reduces UVB-lnduced Inflammatory Responses and Infiltration of Leukocytes in Human Skin. *Photochemistry and Photobiology*, *69*(2), 148-153.

Katsinelos, P., Lazaraki, G., Anastasiadis, S., Chatzimavroudis, G., Katsinelos, T., Terzoudis, S., ... & Kountouras, J. (2019). The impact of selective serotonin receptor inhibitors on post-endoscopic sphincterotomy bleeding, alone or with concurrent aspirin or nonsteroidal anti-inflammatory drugs. *Annals of gastroenterology*, *32*(6), 614.

Kauffman, M. E., Kauffman, M. K., Traore, K., Zhu, H., Trush, M. A., Jia, Z., & Li, Y. R. (2016). MitoSOX-based flow cytometry for detecting mitochondrial ROS. *Reactive oxygen species (Apex, NC)*, *2*(5), 361.

Kaur C, Kapoor HC. (2002). Anti-oxidant capacity and total phenolic content of some Asian vegetables. Int J Food Sci Tech 37:153 161.

Kaur-Sawhney, R., Tiburcio, A. F., Altabella, T., and Galston, A. W. (2003). Polyamines in plants: an overview. J. Cell. Mol. Biol. 2, 1–12.

Kazemi, S., Shirzad, H., & Rafieian-Kopaei, M. (2018). Recent findings in molecular basis of inflammation and anti-inflammatory plants. *Current pharmaceutical design*, *24*(14), 1551-1562.

Kendall, A. C., & Nicolaou, A. (2013). Bioactive lipid mediators in skin inflammation and immunity. *Progress in lipid research*, *52*(1), 141-164.

Kim, H. P., Son, K. H., Chang, H. W., and Kang, S. S. (2004). Anti-inflammatory plant flavonoids and cellular action mechanisms. J. Pharmacol. Sci. 96(3):229–245.

Kim J., DellaPenna D.(2006). Defining the primary route for lutein synthesis in plants: The role of Arabidopsis carotenoid β-ring hydroxylase CYP97A3 Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,103(9) pp. 3474-3479

Knapp, F., & Nicholas, H. (1969). The sterols and triterpenes of banana peel. Phytochemistry, 8, 207–214.

Korhonen, R., Lahti, A., Kankaanranta, H., & Moilanen, E. (2005). Nitric oxide production and signaling in inflammation. *Current Drug Targets-Inflammation & Allergy*, *4*(4), 471-479.

Košir I-J., Lapornik B., Andrenšek S., Wondra A.,Vrhovšek U et Kidric J. (2004). Identification of anthocyanins in wines by liquid chromatography, liquid chromatography-mass spectrometry and nuclear magnetic resonance. Analytica Chimica Acta . 513: 277-282.

Kraus, F., & Ryan, M. T. (2017). The constriction and scission machineries involved in mitochondrial fission. *Journal of cell science*, *130*(18), 2953-2960.

Kuo, H. S., Tsai, M. J., Huang, M. C., Chiu, C. W., Tsai, C. Y., Lee, M. J., ... & Cheng, H. (2011). Acid fibroblast growth factor and peripheral nerve grafts regulate Th2 cytokine expression, macrophage activation, polyamine synthesis, and neurotrophin expression in transected rat spinal cords. *Journal of Neuroscience*, *31*(11), 4137-4147.

Kusano, T., Berberich, T., Tateda, C., and Takahashi, Y. (2008). Polyamines: essential factors for growth and survival. Planta 228, 367–381.

Kumar, P. S., Shiva, K. N., Mayil Vaganan, M., & Uma, S. (2018). Waste utilization and functional foods from Banana. *Indian Horticulture*, *63*(4), 43-46.

Kumar, V., Abbas, AK et Aster, JC (2017). *Livre électronique sur la pathologie de base de Robbins* . Elsevier Health Sciences.

Kumar, K. S., Bhowmik, D., Duraivel, S., & Umadevi, M. (2012). Traditional and medicinal uses of banana. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *1*(3), 51-63.

Landmesser, U., Dikalov, S., Price, S. R., McCann, L., Fukai, T., Holland, S. M., ... & Harrison, D. G. (2003). Oxidation of tetrahydrobiopterin leads to uncoupling of endothelial cell nitric oxide synthase in hypertension. *The Journal of clinical investigation*, *111*(8), 1201-1209.

Lassois, L., Busogoro, J. P., & Jijakli, H. (2009). La banane: de son origine à sa commercialisation. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, *13*(4).

Lassoudière A., (2007). Le bananier et sa culture. Versailles, France : Éditions Quæ.

Lassoudière A, (2010). History of the banana plant. Editions A. Lassoudière

Lee, Y. G., Chu, H., Lu, Y., Leamon, C. P., Srinivasarao, M., Putt, K. S., & Low, P. S. (2019). Regulation of CAR T cell-mediated cytokine release syndrome-like toxicity using low molecular weight adapters. *Nature communications*, *10*(1), 1-11.

Lehmann, U., Jacobasch, G., & Schmiedl, D. (2002). Characterization of resistant starch type III from banana (Musa acuminata). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *50*(18), 5236-5240.

Leopoldini, M., N. Russo et M. Toscano (2011). "The molecular basis of working mechanism of natural polyphenolic antioxidants." Food Chemistry 125(2): 288-306.

Lescot T. (2014). La diversite genetique des bananiers. Fruitrop. (221):98–102.

Leverve, X. (2009). Stress oxydant et antioxydants ? Cahiers de Nutrition et de Diététique, 44(5), pp.219-224.

Li, Y., Zhu, H., Kuppusamy, P., Roubaud, V., Zweier, J. L., & Trush, M. A. (1998). Validation of lucigenin (bis-N-methylacridinium) as a chemilumigenic probe for detecting superoxide anion radical production by enzymatic and cellular systems. *Journal of Biological Chemistry*, *273*(4), 2015-2023.

Li, D., Jiang, L., Piper, J. A., Maksymov, I. S., Greentree, A. D., Wang, E., & Wang, Y. (2019). Sensitive and multiplexed sers nanotags for the detection of cytokines secreted by lymphoma. *ACS sensors*, *4*(9), 2507-2514.

Li LF, Wang HY, Zhang C, Wang XF, FX Shi, Chen WN, Ge XJ. (2013). Origins and domestication of cultivated bananas derived from chloroplasts and nuclear degenes. 8 (11): 80502

Li, J., Sun, Q., Sun, Y., Chen, B., Wu, X., & Le, T. (2019). Improvement of banana postharvest quality using a novel soybean protein isolate/cinnamaldehyde/zinc oxide bionanocomposite coating strategy. *Scientia Horticulturae*, *258*, 108786.

Lin, M. T., & Beal, M. F. (2006). Mitochondrial dysfunction and oxidative stress in neurodegenerative diseases. *Nature*, *443*(7113), 787-795.

Lin, J. Y., and Tang, C. Y. (2008). Strawberry, loquat, mulberry, and bitter melon juices exhibit prophylactic effects on LPS-induced inflammation using murine peritoneal macrophages. Food Chem. 107:1587–1596

Lin-Feng Li, Xue-Jun Ge (2017). Origin and domestication of cultivated banana, Ecological Genetics and Genomics, Volume 2, Pages 1-2, ISSN 2405-9854

Linden et Lorient D. (1994). Pigments et aromes .In: Biochimie agro-industrielle valorisation alimentaire de la production agricole. Ed: Masson. 338-340.

Lim, Y. Y., Lim, T. T., & Tee, J. J. (2007). Antioxidant properties of several tropical fruits: A comparative study. *Food chemistry*, *103*(3), 1003-1008.

Liu, J., Mosavati, B., Oleinikov, A. V., & Du, E. (2019). Biosensors for detection of human placental pathologies: a review of emerging technologies and current trends. *Translational Research*, *213*, 23-49.

Liu, R. H. (2004). Potential synergy of phytochemicals in cancer prevention: mechanism of action. *The Journal of nutrition*, *134*(12), 3479S-3485S. Lizada C. Mango. In: Seymour GB, Taylor JE, Tucker GA, editors. Biochemistry of Fruit Ripening. Springer Netherlands; 1993. p. 255–71.

Loo, S. W., & Pui, T. S. (2020). Cytokine and cancer biomarkers detection: The dawn of electrochemical paper-based biosensor. *Sensors*, *20*(7), 1854.

Loeseck.(1950). Chemical changes during banana ripening.*Chimie physiologie et technologie*, *4*(p. 67–118). New York: Interscience.

Lopez, M., F. Martinez, C. Del Valle, M. Ferrit et R. Luque (2003). "Study of phenolic compounds as natural antioxidants by a fluorescence method." Talanta 60(2-3): 609- 616.

Luyckx, A., Lechaudel, M., Hubert, O., Salmon, F., & Brat, P. (2016). Banana peel physiological post-harvest disorders: A review.

Ma, L., Liu, T. W., Wallig, M. A., Dobrucki, I. T., Dobrucki, L. W., Nelson, E. R., ... & Smith, A. M. (2016). Efficient targeting of adipose tissue macrophages in obesity with polysaccharide nanocarriers. *ACS nano*, *10*(7), 6952-6962.

Madamba L.S.P., Baes A.U. & Mendoza D.B., (1977). Effect of maturity on some biochemical changes during ripening of banana (Musa sapientum L. cv. Lakatan). Food Chem., 2, 177-183.

Mailloux, R.J., and Harper, M.-E. (2011). Uncoupling proteins and the control of mitochondrial reactive oxygen species production. Free Radic. Biol. Med. 51, 1106–1115.

Majno, G., & Joris, I. (2004). *Cells, tissues, and disease: principles of general pathology*. Oxford University Press.

Male, D., Brostoff, J., Roth, D.B., Roitt, I., (2007). Immunologie, Nouv. ed. ed. Elsevier Masson, Issy-les-Moulineaux

Manach C. (1998). Biodisponibilté des flavonoïdes. Thèse: Clermont-Ferrand: Université Blaise Pascal.

Manach C., Scalbert A., Morand C., Rémésy C., Jiménez L. (2004). Polyphenols: food sources and bioavailability.The American Journal of Clinical Nutrition, 79 (5), pp.727-747

Mao R, Zhang C, Chen J, Zhao G, Zhou R, Wang F, Xu J, Yang T, Su Y, Huang J, Wu Z, Cao L, Wang Y, Hu Y, Yuan C, Yi Z, Hong W, Wang Z, Peng D, Fang Y.(2018). Different levels of pro- and anti-inflammatory cytokines in patients with unipolar and bipolar depression. Journal of Affective Disorders. 237:65–72.

Marriot, J. (1980). Bananas – physiology and biochemistry of storage and ripening for optimum quality. CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 41–88.

Marriott, J., Robinson, M., and Karikari, S. K. (1981). Starch and sugar transformation during the ripening of plantains and bananas. J. Sci. Food Agric. 32, 1021–1026.

Martin, S., Andriambeloson, E., Takeda, K., & Andriantsitohaina, R. (2002). Red wine polyphenols increase calcium in bovine aortic endothelial cells: a basis to elucidate signalling pathways leading to nitric oxide production. *British journal of pharmacology*, *135*(6), 1579-1587.

Martin-Prével, P. (1962). Les éléments minéraux dans le bananier et dans son régime.

Masella, R., R. Di Benedetto, R. Vari, C. Filesi et C. Giovannini (2005). "Novel mechanisms of natural antioxidant compounds in biological systems: Involvement of glutathione and glutathione-related enzymes." Journal of Nutritional Biochemistry 16(10): 577- 586.

Masi, A., Glozier, N., Dale, R., & Guastella, A. J. (2017). The immune system, cytokines, and biomarkers in autism spectrum disorder. *Neuroscience bulletin*, *33*(2), 194-204.

Mattila, P., Hellström, J., & Törrönen, R. (2006). Phenolic acids in berries, fruits, and beverages. *Journal of agricultural and food chemistry*, *54*(19), 7193-7199.

Maqsood, Sajid & Benjakul, Soottawat & Shahidi, Fereidoon. (2013). Emerging Role of Phenolic Compounds as Natural Food Addi tives in Fish and Fish Products. Critical reviews in food science and nutrition.

Maulina, S. (2020). Extraction of Phenol Compounds in the Liquid Smoke by Pyrolysis of Oil Palm Fronds. *Journal of Innovation and Technology*, *1*(1), 1-4.

Mbida Mindzie, Christophe ; Doutrelepont, Hughes ; Vrydaghs, Luc ; Swennen, Rony ; Swennnen, Rudy ; Beeckman, H ; De Langhe, Edmond ; De Maret, P. (2001). First archeological evidence of banana cultivation in central Africa during the third millenium before present.Vegetation History and Archaeobotany vol :10 pages:1-6

McGEER, P. L., & McGEER, E. G. (2004). Inflammation and the degenerative diseases of aging. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1035*(1), 104-116.

Mebirouk R. (2017). Recherche et évaluation des activités biologiques de trois extraits d'Helix aspersa (aqueux, hydro alcoolique et organique) : Activités anti-inflammatoire, anti tumorale et antiangiogénique. Thèse de Doctorat. Université des frères Mentouri Constantine, Algérie. 172 p

Medzhitov, R.,(2008). Origin and physiological roles of inflammation. Nature 454, 428-435.

Medzhitov, R. (2010). Inflammation 2010: new adventures of an old flame. *Cell*, *140*(6), 771-776.

Menezes, E. W., Tadini, C. C., Tribess, T. B., Zuleta, A., Binaghi, J., Pak, N., ... & Lajolo, F. M. (2011). Chemical composition and nutritional value of unripe banana flour (Musa acuminata, var. Nanicão). *Plant foods for human nutrition*, *66*(3), 231-237.

Mercier, J. P., & Godard, P. (2001). *Chimie organique: une initiation*. PPUR presses polytechniques.

Mezzetti, A., Pierdomenico, S. D., Costantini, F., Romano, F., De Cesare, D., Cuccurullo, F., ... & Fellin, R. (1998). Copper/zinc ratio and systemic oxidant load: effect of aging and aging-related degenerative diseases. *Free Radical Biology and Medicine*, *25*(6), 676-681.

Micol V., Caturia N., Perez-Fons L., Mas V., Perez L. et Estepa A. (2005). The olive leaf extract exhibits antiviral activity against viral haemorrhagic septicaemia Rhadovirus (VHSV). Antiviral Research. 66: 12 9-136.

Miossec, P. (2020). Cytokines proinflammatoires et risque cardio-vasculaire: De l'infarctus du myocarde à la tempête cytokinique du Covid-19. *Bulletin De L'Academie Nationale De Medecine*.

Mohapatra, D., Mishra, S., & Sutar, N. (2010). Banana and its by-product utilisation: an overview.

Mohapatra D., Mishra S., Singh CB, Jayas DS. (2011). Food and Bioprocess Technology, 4(3)(2011), p.327-339

Mompon B., Lemaire B., Mengal P. et Surbel D. (1996). Extraction des polyphénols : du laboratoire à la production industrielle. IN « Polyphénols 96 ». Ed INRA. 31-35.

Morel, S., Arnould, S., Vitou, M., Boudard, F., Guzman, C., Poucheret, P. & Rapior, S. (2018). Antiproliferative and antioxidant activities of wild Boletales mushrooms from France. *International journal of medicinal mushrooms*, *20*(1).

Morton, J. (1987). Fruits of warm climates. Durian 1: 287-291.

Mota, R., Lajolo, F., and Cordenunsi, B. (1997). Composition of carbohydrates from banana cultivars (Musa spp.) during ripening. Food Sci. Technol. 17, 94–97.

MPharm, S. R. (2012). Anti-inflammatory and antioxidant activities of extracts from Musa sapientum peel. *J Med Assoc Thai*, *95*(1), S142-S146.

Mukhopadhyay, P., Rajesh, M., Haskó, G., Hawkins, B. J., Madesh, M., & Pacher, P. (2007). Simultaneous detection of apoptosis and mitochondrial superoxide production in live cells by flow cytometry and confocal microscopy. *Nature protocols*, *2*(9), 2295.

Naim, Z., Billah, M., Ibrahim, M., Debnath, D., M Masud Rana, S., Arefin, P., & Mukul, E. H. (2015). Anti-inflammatory, analgesic and anti-nociceptive efficacy of peel of abelmoschus esculentus fruits in laboratory animal. *Current Drug Therapy*, *10*(2), 113-121.

Newton, K., & Dixit, V. M. (2012). Signaling in innate immunity and inflammation. *Cold Spring Harbor perspectives in biology*, *4*(3), a006049.

Nicholls, D. G., & Ferguson, S. J. (2002). *Bioenergetics 3* (Vol. 3). Gulf Professional Publishing.

Ngo, T. V., Scarlett, C. J., Bowyer, M. C., Ngo, P. D., & Vuong, Q. V. (2017). Impact of different extraction solvents on bioactive compounds and antioxidant capacity from the root of Salacia chinensis L. *Journal of Food Quality*, *2017*.

Normand, S. (2009). Étude des profils cytokiniques et des mécanismes moléculaires induisant l'inflammation dans un modèle mimant les déficits en mévalonate kinase : un rôle central pour l'IL-1 et la caspase-1 dans les fièvres périodiques héréditaires. Thèse de doctorat, Université de Poitiers. 187 p.

Nunnari, J., & Suomalainen, A. (2012). Mitochondria: in sickness and in health. *Cell*, *148*(6), 1145-1159.

O'Byrne, K. J. and Dalgleish, A. G. (2001). Chronic immune activation and inflammation as the cause of malignancy. British Journal of Cancer, 85:473 – 483.

O'Byrne, K. J., Dalgleish, A. G., Browning, M. J., Steward, W. P. and Harris, A. L. (2000). The relationship between angiogenesis and the immune response in carcinogenesis and the progression of malignant disease. European Journal of Cancer, 36: 151 – 169

O'Connell J.E., Fox P.F. (2001). Signification and applications of phenolic compounds in the production and quality of milk dairy products: a review. International Diary Journal. 11(3): 103-120.

Ocimati W., Ntamwira J., Groot J.C.J., Taulya G., Tittonell P., Dhed'a B., van Asten P., Vanlauwe B., Ruhigwa B., Blomme G. (2019). Banana leaf pruning to facilitate annual legume intercropping as an intensification strategy in the East African highlands, European Journal of Agronomy, Volume 110, 125923, ISSN 1161-0301

Olichon, A., Emorine, L. J., Descoins, E., Pelloquin, L., Brichese, L., Gas, N., ... & Belenguer, P. (2002). The human dynamin-related protein OPA1 is anchored to the mitochondrial inner membrane facing the inter-membrane space. *FEBS letters*, *523*(1-3), 171-176.

Olichon, A., Baricault, L., Gas, N., Guillou, E., Valette, A., Belenguer, P., & Lenaers, G. (2003). Loss of OPA1 perturbates the mitochondrial inner membrane structure and integrity, leading to cytochrome c release and apoptosis. *Journal of Biological Chemistry*, *278*(10), 7743-7746.

Olichon, A., Elachouri, G., Baricault, L., Delettre, C., Belenguer, P., & Lenaers, G. (2007). OPA1 alternate splicing uncouples an evolutionary conserved function in mitochondrial fusion from a vertebrate restricted function in apoptosis. *Cell Death & Differentiation*, *14*(4), 682-692.

Oliveira, L., Freire, C. S. R., Silvestre, A. J. D., Cordeiro, N., Torres, I. C., & Evtuguin, D. (2006). Lipophilic extractives from different morphological parts of banana plant "Dwarf Cavendish". *Industrial Crops and Products*, *23*(2), 201-211.

Oliveira, L., Cordeiro, N., Evtuguin, D. V., Torres, I. C., & Silvestre, A. J. D. (2007). Chemical composition of different morphological parts from 'Dwarf Cavendish'banana plant and their potential as a non-wood renewable source of natural products. *Industrial Crops and Products*, *26*(2), 163-172.

Oliveira, L., Freire, C. S., Silvestre, A. J., & Cordeiro, N. (2008). Lipophilic extracts from banana fruit residues: a source of valuable phytosterols. *Journal of agricultural and food chemistry*, *56*(20), 9520-9524.

Oppenheim J. J., Tewary P., de la Rosa G. and Yang D. (2007). Alarmins initiate host defense. Adv Exp Med Biol 601, 185-94.

Oroian, M., & Escriche, I. (2015). Antioxidants: Characterization, natural sources, extraction and analysis. *Food Research International*, *74*, 10-36.

Osman, A. M., K. K. Y. Wong, S. J. Hill et A. Fernyhough (2006). "Isolation and the characterization of the degradation products of the mediator ABTS-derived radicals formed upon reaction with polyphenols." Biochemical and Biophysical Research Communications 340(2): 597-603.

Ou, B., Hampsch-Woodill, M., & Prior, R. L. (2001). Development and validation of an improved oxygen radical absorbance capacity assay using fluorescein as the fluorescent probe. *Journal of agricultural and food chemistry*, *49*(10), 4619-4626.

Ou, B., D. Huang, M. Hampsch-Woodill, J. A. Flanagan et E. K. Deemer (2002). "Analysis of antioxidant activities of common vegetables employing oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and ferric reducing antioxidant power (FRAP) assays: A comparative study." Journal of Agricultural and Food Chemistry 50(11): 3122-3128.

Pacher, P., Beckman, J. S., & Liaudet, L. (2007). Nitric oxide and peroxynitrite in health and disease. *Physiological reviews*, *87*(1), 315-424.

Pacheco-Sanchez, M., Boutin, Y., Angers, P., Gosselin, A., & Tweddell, R. J. (2006). A bioactive (1→ 3)-,(1→ 4)-β-d-glucan from Collybia dryophila and other mushrooms. *Mycologia*, *98*(2), 180-185.

Palmer, J. K. (1963). Banana polyphenoloxidase. Preparation and properties. *Plant Physiology*, *38*(5), 508.

Pariente, R. (2004). Oxyde nitrique. *EMC-Pneumologie*, *1*(1), 37-39.

Parul, R., Kundu, S. K., & Saha, P. (2013). In vitro nitric oxide scavenging activity of methanol extracts of three Bangladeshi medicinal plants. *The pharma innovation*, *1*(12, Part A), 83.

Patel, U., Rajasingh, S., Samanta, S., Cao, T., Dawn, B., & Rajasingh, J. (2017). Macrophage polarization in response to epigenetic modifiers during infection and inflammation. *Drug discovery oday*, *22*(1), 186-193.

Patthamakanokporn, O., Puwastien, P., Nitithamyong, A., & Sirichakwal, P. P. (2008). Changes of antioxidant activity and total phenolic compounds during storage of selected fruits. *Journal of Food Composition and Analysis*, *21*(3), 241-248.

Pazzaglia, S., & Pioli, C. (2020). Multifaceted role of PARP-1 in DNA repair and inflammation: pathological and therapeutic implications in cancer and non-cancer diseases. *Cells*, *9*(1), 41.

Pech J-C., Bouzayen M., Latche A.,.(2008). Climacteric fruit ripening: Ethylene-dependent and independent regulation of ripening pathways in melon fruit. Plant science 175, 114-120.

Peer, W. A., Brown, D. E., Tague, B. W., Muday, G. K., Taiz, L., & Murphy, A. S. (2001). Flavonoid accumulation patterns of transparent testa mutants of Arabidopsis. *Plant Physiology*, *126*(2), 536-548.

Pegg, A. E. (2016). Functions of polyamines in mammals. J. Biol. Chem. 291, 14904–14912.

Pelissari, F. M., Andrade-Mahecha, M. M., Sobral, P. J. D. A., & Menegalli, F. C. (2012). Isolation and characterization of the flour and starch of plantain bananas (Musa paradisiaca). *Starch-Stärke*, *64*(5), 382-391.

Pelletier, M., Lepow, T. S., Billingham, L. K., Murphy, M. P., & Siegel, R. M. (2012). New tricks from an old dog: mitochondrial redox signaling in cellular inflammation. In *Seminars in immunology* (Vol. 24, No. 6, pp. 384-392). Academic Press.

Pereira A, Maraschin M. (2015). Banana (Musa spp) from skin to flesh: ethnopharmacology, source of compound bioactives and its relevance to human health. J Ethnopharmacol. February 3rd 2015; 160: 149-63.

Pereira, G. A., Molina, G., Arruda, H. S., & Pastore, G. M. (2017). Optimizing the Homogenizer-Assisted Extraction (HAE) of Total Phenolic Compounds from Banana Peel. *Journal of Food Process Engineering*, *40*(3), e12438.

Pernas, L., & Scorrano, L. (2016). Mito-morphosis: mitochondrial fusion, fission, and cristae remodeling as key mediators of cellular function. *Annual review of physiology*, *78*, 505-531.

Perrier X., De Langhe E., Donohue M. (2011). Multidisciplinary perspectives on banana domestication (Musa spp.). Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,108, p.11311-11318

Peterson, D. G., Boehm, K. S., & Stack, S. M. (1997). Isolation of milligram quantities of nuclear DNA from tomato (Lycopersicon esculentum), a plant containing high levels of polyphenolic compounds. *Plant Molecular Biology Reporter*, *15*(2), 148-153.

Peumans, W. J., Proost, P., Swennen, R. L., & Van Damme, E. J. (2002). The abundant class III chitinase homolog in young developing banana fruits behaves as a transient vegetative storage protein and most probably serves as an important supply of amino acids for the synthesis of ripening-associated proteins. *Plant physiology*, *130*(2), 1063-1072.

Pinelo, M., L. Manzocco, M. J. Nunez et M. C. Nicoli (2004). "Solvent effect on quercetin antioxidant capacity." Food Chemistry 88(2): 201-207.

Plonka J, Michalski A. (2017). The influence of processing technique on the catecholamine and indolamine contents of fruits Journal of Food Composition and Analysis, 57, pp.102-108

Pouillot, A., Polla, L. L., Tacchini, P., Neequaye, A., Polla, A., & Polla, B. (2011). Natural antioxidants and their effects on the skin. *Formulating, packaging, and marketing of natural cosmetic products*, 239-257.

Prasanna V., Prabha T.N., Tharanathan, R.N., (2007). Fruit Ripening Phenomena-An Overview. F.Sci. Nutri., 47, 1-19.

Prior, R. L., Wu, X., & Schaich, K. (2005). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal of agricultural and food chemistry*, *53*(10), 4290-4302.

Prost, M. (1989). "Utilisation des générateurs de radicaux libres dans le domaines des dosages biologiques."

Przybylski, C., Gonnet, F., Saesen, E., Lortat-Jacob, H., & Daniel, R. (2020). Surface plasmon resonance imaging coupled to on-chip mass spectrometry: a new tool to probe protein-GAG interactions. *Analytical and bioanalytical chemistry*, *412*(2), 507-519.

Pua E., Davey M. (2007). Banana Transgenic Crops V, pp. Pp3-34

Qamar, S., & Shaikh, A. (2018). Therapeutic potentials and compositional changes of valuable compounds from banana-A review. *Trends in food science & technology*, *79*, 1-9.

Raghav, S. K., Gupta, B., Agrawal, C., Goswami, K., & Das, H. R. (2006). Anti-inflammatory effect of Ruta graveolens L. in murine macrophage cells. *Journal of ethnopharmacology*, *104*(1-2), 234-239.

Rahman, K. (2007). Studies on free radicals, antioxidants, and co-factors. *Clinical interventions in aging*, *2*(2), 219.

Ramli, S. B., Alkarkhi, A. F., Yong, Y. S., & Easa, A. M. (2009). The use of principle component and cluster analyses to differentiate banana pulp flours based on starch and dietary fiber components. *International journal of food sciences and nutrition*, 60(sup4), 317-325.

Rao, U. M., Ahmad, B. A., & Mohd, K. S. (2016). In vitro nitric oxide scavenging and anti-inflammatory activities of different solvent extracts of various parts of Musa paradisiaca. *Malaysian J. Anal. Sci*, *20*(5), 1191-1202.

Raymondjean, M. (2007). Les mécanismes de l'inflammation périphérique. *Revue Francophone des Laboratoires*, *2007*(389), 21-28.

Rebello, L. P. G., Ramos, A. M., Pertuzatti, P. B., Barcia, M. T., Castillo-Muñoz, N., & Hermosín-Gutiérrez, I. (2014). Flour of banana (Musa AAA) peel as a source of antioxidant phenolic compounds. *Food Research International*, *55*, 397-403.

Rezatabar, S., Karimian, A., Rameshknia, V., Parsian, H., Majidinia, M., Kopi, T. A., & Yousefi, B. (2019). RAS/MAPK signaling functions in oxidative stress, DNA damage response and cancer progression. *Journal of cellular physiology*, *234*(9), 14951-14965.

Ribeiro M T., Waffo-Teguo P., Teissèdre PL. (1999). Determination of stilbenes (transastringin, cis and trans piceid, and cis and trans resvératrol) in portuguese wines. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 47: 266-267.

Ribéreau-Gayon P. (1968). Les composés phénoliques des végétaux. Edition Dunod. Paris. Pp : 173-201

Richter G. (1993). Composés phénoliques in Métabolisme des végétaux: physiologie et biochimie. Ed Presse polytechnique et universitaire romande. pp: 317-339.

Robinson, M. W., Harmon, C., & O'Farrelly, C. (2016). Liver immunology and its role in inflammation and homeostasis. *Cellular & molecular immunology*, *13*(3), 267-276.

Rochette, L. (2008). Stress oxydant et sepsis. Réanimation, 17(6), pp. 1-4.

Roelofs, B. A., Shealinna, X. G., Studlack, P. E., & Polster, B. M. (2015). Low micromolar concentrations of the superoxide probe MitoSOX uncouple neural mitochondria and inhibit complex IV. *Free Radical Biology and Medicine*, *86*, 250-258.

Roginsky, V., & Lissi, E. A. (2005). Review of methods to determine chain-breaking antioxidant activity in food. *Food chemistry*, *92*(2), 235-254.

Roquilly, A., & Asehnoune, K. (2019). Corticoïdes et sepsis. *Anesthésie & Réanimation*, *5*(3), 186-192.

Ross, M. F., Kelso, G. F., Blaikie, F. H., James, A. M., Cocheme, H. M., Filipovska, A., ... & Murphy, M. P. (2005). Lipophilic triphenylphosphonium cations as tools in mitochondrial bioenergetics and free radical biology. *Biochemistry (Moscow)*, *70*(2), 222-230.

Rubartelli, A., & Lotze, M. T. (2007). Inside, outside, upside down: damage-associated molecular-pattern molecules (DAMPs) and redox. *Trends in immunology*, *28*(10), 429-436.

Rutkowski, R., Pancewicz, S. A., Rutkowski, K., & Rutkowska, J. (2007). Reactive oxygen and nitrogen species in inflammatory process. *Polski merkuriusz lekarski: organ Polskiego Towarzystwa Lekarskiego*, *23*(134), 131-136.

Sarni-Manchad, P., & Cheynier, V. (2006). Les polyphénols en agroalimentaire, Éd Tec & Doc. *Coll. Sci. & Techn. Agroaliment., Lavoisier, Paris*.

Saravanan K, Aradhya SM. (2011). Polyphenols of Pseudostem of Different Banana Cultivars and Their Antioxidant Activities. J Agric Food Chem. 59(8):3613–23.

Sarawong, C., Schoenlechner, R., Sekiguchi, K., Berghofer, E., & Ng, P. K. (2014). Effect of extrusion cooking on the physicochemical properties, resistant starch, phenolic content and antioxidant capacities of green banana flour. *Food chemistry*, *143*, 33-39.

Sasipriya, G., Maria, C. L., & Siddhuraju, P. (2014). Influence of pressure cooking on antioxidant activity of wild (Ensete superbum) and commercial banana (Musa paradisiaca var. Monthan) unripe fruit and flower. *Journal of food science and technology*, *51*(10), 2517-2525.

Scalbert, A., & Williamson, G. (2000). Dietary intake and bioavailability of polyphenols. *The Journal of nutrition*, *130*(8), 2073S-2085S.

Schroeter, H., C. Boyd, J. P. E. Spencer, R. J. Williams, E. Cadenas et C. Rice-Evans (2002). "MAPK signaling in neurodegeneration: Influences of flavonoids and of nitric oxide." Neurobiology of Aging 23(5): 861-880.

Shahidi, F., & Zhong, Y. (2015). Measurement of antioxidant activity. *Journal of functional foods*, *18*, 757-781.

Shajib, M. S., & Khan, W. I. (2015). The role of serotonin and its receptors in activation of immune responses and inflammation. *Acta physiologica*, *213*(3), 561-574.

Shan W., Kuang J., Chen L., Xie H., Peng H., Xiao Y., Li X., Chen W., He Q. Chen J. (2001). Molecular characterization of banana NAC transcription factors and their interactions with ethylene signalling component EIL during fruit ripening J. Exp. Bot., 63 (2012), pp. 5171-5187.

Shen, C. Y., Yang, L., Jiang, J. G., Zheng, C. Y., & Zhu, W. (2017). Immune enhancement effects and extraction optimization of polysaccharides from Citrus aurantium L. var. amara Engl. *Food & function*, *8*(2), 796-807.

Scarminio, V., Fruet, A. C., Witaicenis, A., Rall, V. L., & Di Stasi, L. C. (2012). Dietary intervention with green dwarf banana flour (Musa sp AAA) prevents intestinal inflammation in a trinitrobenzenesulfonic acid model of rat colitis. *Nutrition Research*, *32*(3), 202-209.

Schieber, A., Stintzing, F. C., & Carle, R.. (2001). By-products of plant food processing as a source of functional compounds—recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, *12*(11), 401-413.

Schneeman, B. O. (1987). Soluble vs insoluble fiber: different physiological responses. *Food Technology*.

Seifried, H. E., Anderson, D. E., Fisher, E. I., & Milner, J. A. (2007). A review of the interaction among dietary antioxidants and reactive oxygen species. *The Journal of nutritional biochemistry*, *18*(9), 567-579.

Sheng, Z. W., Ma, W. H., Jin, Z. Q., Bi, Y., Sun, Z. G., Dou, H. T., ... & Han, L. N. (2010). Investigation of dietary fiber, protein, vitamin E and other nutritional compounds of banana flower of two cultivars grown in China. *African Journal of Biotechnology*, *9*(25), 3888-3895.

Serhan, C. N. (2007). Resolution phase of inflammation: novel endogenous anti-inflammatory and proresolving lipid mediators and pathways. *Annu. Rev. Immunol.*, *25*, 101-137.

Shiga, T. M., Soares, C. A., Nascimento, J. R. J., Purgatto, E., Lajolo, F. M., and Cordenunsi, B. R. (2011). Ripening-associated changes in the amounts of starch and non-starch polysaccharides and their contributions to fruit softening in three banana cultivars. J. Sci. Food Agric. 91, 1511–1516.

Shimizu, T. (2009). Lipid mediators in health and disease: enzymes and receptors as therapeutic targets for the regulation of immunity and inflammation. *Annual review of pharmacology and toxicology*, *49*, 123-150.

Silva S., Gomes L., Leitao F., Bronse M., Caelho A.V. et Boas V. (2010). Secoiridoids in olive seed: characterization of nüzhenide and 11-methyl oleosides by liquid chromatography with diode array and mass spectrometry. Grassasy Aceittes. 61 (02): 157-164.

Simmonds, N. W., & Weatherup, S. T. C. (1990). Numerical taxonomy of the wild bananas (Musa). *New Phytologist*, *115*(3), 567-571.

Singh, B., Singh, J. P., Kaur, A., & Singh, N. (2016). Bioactive compounds in banana and their associated health benefits–A review. *Food Chemistry*, *206*, 1-11.

Singh, R., Kaushik, R., & Gosewade, S. (2018). Bananas as underutilized fruit having huge potential as raw materials for food and non-food processing industries: a brief review. *The Pharma Innovation Journal*, *7*(6), 574-580.

Singh, N., Baby, D., Rajguru, J. P., Patil, P. B., Thakkannavar, S. S., & Pujari, V. B. (2019). Inflammation and cancer. *Annals of African medicine*, *18*(3), 121.

Siriwardhana, N., Kalupahana, N. S., Cekanova, M., LeMieux, M., Greer, B., & Moustaid-Moussa, N. (2013). Modulation of adipose tissue inflammation by bioactive food compounds. *The Journal of nutritional biochemistry*, *24*(4), 613-623.

Škerget, M., Kotnik, P., Hadolin, M., Hraš, A. R., Simonič, M., & Knez, Ž. (2005). Phenols, proanthocyanidins, flavones and flavonols in some plant materials and their antioxidant activities. *Food chemistry*, *89*(2), 191-198.

Slaats, J., Ten Oever, J., van de Veerdonk, FL et Netea, MG (2016). IL-1β / IL-6 / CRP et IL-18 / ferritine: programmes inflammatoires distincts dans les infections. *Pathogènes PLoS* , *12* (12), e1005973.

Smith, W. L., DeWitt, D. L., & Garavito, R. M. (2000). Cyclooxygenases: structural, cellular, and molecular biology. *Annual review of biochemistry*, *69*(1), 145-182.

Soares, C. A., Peroni-Okita, F. H. G., Cardoso, M. B., Shitakubo, R., Lajolo, F. M., and Cordenunsi, B. R. (2011). Plantain and banana starches: granule structural characteristics explain the differences in their starch degradation patterns. J. Agric. Food Chem. 59, 6672–6681.

Someya, S., Yoshiki, Y., & Okubo, K. (2002). Antioxidant compounds from bananas (Musa Cavendish). *Food chemistry*, *79*(3), 351-354.

Sterka Jr, D., & Marriott, I. (2006). Characterization of nucleotide-binding oligomerization domain (NOD) protein expression in primary murine microglia. *Journal of neuroimmunology*, *179*(1-2), 65-75.

Stover, R.H. and Simmonds, N.W. (1987). Classification of banana cultivars. In: Stover RH and Simmonds NW (ed.) Bananas, 3rd edn. Wiley, New York, 97-103.

Sulaiman, S. F., Yusoff, N. A. M., Eldeen, I. M., Seow, E. M., Sajak, A. A. B., & Ooi, K. L. (2011). Correlation between total phenolic and mineral contents with antioxidant activity of eight Malaysian bananas (Musa sp.). *Journal of Food Composition and Analysis*, *24*(1), 1-10.

Sundaram S, Anjum S, Dwivedi P, Rai GK. (2011). Antioxidant activity and protective effect of banana peel against oxidative hemolysis of human erythrocyte at different stages of ripening. Appl Biochem Biotechnol. 164(7):1192-206.

Tabas, I., & Glass, C. K. (2013). Anti-inflammatory therapy in chronic disease: challenges and opportunities. *Science*, *339*(6116), 166-172.

Tahara, E. B., Navarete, F. D., & Kowaltowski, A. J. (2009). Tissue-, substrate-, and site-specific characteristics of mitochondrial reactive oxygen species generation. *Free Radical Biology and Medicine*, *46*(9), 1283-1297.

Tavares da Silva, S., Araujo dos Santos, C., Marvila Girondoli, Y., Mello de Azeredo, L., Sousa Moraes, L. F. D., Keila Viana Gomes Schitini, J., ... & Bressan, J. (2014). Las mujeres con síndrome metabólico mejoran los parámetros antropométricos y bioquímicos con el consumo de" green banana flour". *Nutrición Hospitalaria*, *29*(5), 1070-1080.

Tawaha, K., Alali, F. Q., Gharaibeh, M., Mohammad, M., & El-Elimat, T. (2007). Antioxidant activity and total phenolic content of selected Jordanian plant species. *Food chemistry*, *104*(4), 1372-1378.

Tharanathan, R. N. (2002). Food-derived carbohydrates: Structural complexity and functional diversity. Critical Reviews in Biotechnology, 22(1), 65–84.

Thebaudin JY, Lefebvre AC, Harrington M, Bourgeois CM. (1997). Dietary fibres: Nutritional and technological interest. Trends Food Sci Technol 8:41 48.

Thomas, P., & Nair, P. M. (1971). Effect of gamma irradiation on polyphenol oxidase activity and its relation to skin browning in bananas. *Phytochemistry*, *10*(4), 771-777.

Toh, P. Y., Leong, F. S., Chang, S. K., Khoo, H. E., & Yim, H. S. (2016). Optimization of extraction parameters on the antioxidant properties of banana waste. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, *15*(1), 65-78.

Toyama, E. Q., Herzig, S., Courchet, J., Lewis, T. L., Losón, O. C., Hellberg, K., ... & Shaw, R. J. (2016). AMP-activated protein kinase mediates mitochondrial fission in response to energy stress. *Science*, *351*(6270), 275-281.

Trease, GE, Evans et WCA (1989). *Manuel de pharmacognosie* (13e éd., P. 180–181). Bailliere, Tindall, Londres.

Tsamo, C. V. P., Herent, M. F., Tomekpe, K., Emaga, T. H., Quetin-Leclercq, J., Rogez, H., ... & Andre, C. M. (2015). Effect of boiling on phenolic profiles determined using HPLC/ESI-LTQ-Orbitrap-MS, physico-chemical parameters of six plantain banana cultivars (Musa sp). *Journal of Food Composition and Analysis*, *44*, 158-169.

Tucker G.A. & Grierson D., 1987. Fruit ripening. In: Davies D.D., ed. The biochemistry of plants. A comprehensive treatise, vol. 12, Physiology of metabolism. London: Academic Press, 265-319.

Twig, G., Elorza, A., Molina, A. J., Mohamed, H., Wikstrom, J. D., Walzer, G., & Stiles, L. 740 Haigh SE, Katz S, Las G, Alroy J, Wu M, Py BF, Yuan J, Deeney JT, Corkey BE, 741 Shirihai OS. (2008). Fission and selective fusion govern mitochondrial segregation and 742 elimination by autophagy. *EMBO J*, *27*, 433-446.

Valko, M., C. J. Rhodes, J. Moncol, M. Izakovic et M. Mazur (2006). "Free radicals, metals and antioxidants in oxidative stress-induced cancer." Chemico-Biological Interactions 160(1): 1-40.

Valko, M., Leibfritz, D., Moncol, J., Cronin, M. T., Mazur, M., & Telser, J. (2007). Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. *The international journal of biochemistry & cell biology*, *39*(1), 44-84.

Vaughn, K. C., & Duke, S. O. (1984). Function of polyphenol oxidase in higher plants. *Physiologia Plantarum*, *60*(1), 106-112.

Veerman, R. E., Akpinar, G. G., Eldh, M., & Gabrielsson, S. (2019). Immune cell-derived extracellular vesicles–functions and therapeutic applications. *Trends in molecular medicine*, *25*(5), 382-394.

Vijayakumar, S., Presannakumar, G., & Vijayalakshmi, N. R. (2009). Investigations on the effect of flavonoids from banana, Musa paradisiaca L. on lipid metabolism in rats. *Journal of dietary supplements*, *6*(2), 111-123.

Vilela, C., Santos, S. A., Villaverde, J. J., Oliveira, L., Nunes, A., Cordeiro, N. & Silvestre, A. J. (2014). Lipophilic phytochemicals from banana fruits of several Musa species. *Food chemistry*, *162*, 247-252.

Vilhena, R. D. O., Marson, B. M., Budel, J. M., Amano, E., Messias-Reason, I. J. D. T., & Pontarolo, R. (2019). Morpho-anatomy of the inflorescence of Musa× paradisiaca. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, *29*(2), 147-151.

Viuda-Martos, M., Ruiz-Navajas, Y., Fernández-López, J., Sendra, E., Sayas-Barberá, E., & Pérez-Álvarez, J. A. (2011). Antioxidant properties of pomegranate (Punica granatum L.) bagasses obtained as co-product in the juice extraction. *Food Research International*, *44*(5), 1217-1223.

Vu, H. T., Scarlett, C. J., & Vuong, Q. V. (2017). Optimization of ultrasound-assisted extraction conditions for recovery of phenolic compounds and antioxidant capacity from banana (Musa cavendish) peel. *Journal of food processing and preservation*, *41*(5), e13148.

Waalkes, T.P., A. Sjoerdsma, C.R. Creveling, H. Weissbach, and S. Udenfriend. (1958). Serotonin, Norepinephrine, and Related Compounds in Bananas. Science 127:648-650.

Wai, T., & Langer, T. (2016). Mitochondrial dynamics and metabolic regulation. *Trends in Endocrinology & Metabolism*, *27*(2), 105-117.

Wall MM. (2006). Ascorbic acid, vitamin A, and mineral composition of banana (Musa sp.) and papaya (Carica papaya) cultivars grown in Hawaii. J Food Comp Anal 19:434 445.

Wang, B., & Tontonoz, P. (2019). Phospholipid remodeling in physiology and disease. *Annual review of physiology*, *81*, 165-188.

Wardman, P. et L. P. Candeias (1996). "Fenton chemistry: An introduction." Radiation Research 145(5): 523-531.

Wen, L., Shi, D., Zhou, T., Liu, H., Jiang, Y., & Yang, B. (2019). Immunomodulatory mechanism of α-d-(1→ 6)-glucan isolated from banana. *RSC advances*, *9*(12), 6995-7003;

Westermann, B. (2010). Mitochondrial fusion and fission in cell life and death. *Nature reviews Molecular cell biology*, *11*(12), 872-884.

Wolters, M., Hermann, S., Golf, S., Katz, N., & Hahn, A. (2006). Selenium and antioxidant vitamin status of elderly German women. *European journal of clinical nutrition*, *60*(1), 85-91.

Wu, X., Beecher, G. R., Holden, J. M., Haytowitz, D. B., Gebhardt, S. E., & Prior, R. L. (2004). Lipophilic and hydrophilic antioxidant capacities of common foods in the United States. *Journal of agricultural and food chemistry*, *52*(12), 4026-4037.

Wu, GJ, Shiu, SM, Hsieh, MC et Tsai, GJ (2016). Activité anti-inflammatoire d'un polysaccharide sulfaté de l'algue brune Sargassum cristaefolium. *Hydrocolloïdes alimentaires , 53 ,* 16-23.

Wu, H., Denna, T. H., Storkersen, J. N., & Gerriets, V. A. (2019). Beyond a neurotransmitter: the role of serotonin in inflammation and immunity. *Pharmacological research*, *140*, 100-114.

Wuyts, N., De Waele, D., & Swennen, R. (2006). Extraction and partial characterization of polyphenol oxidase from banana (Musa acuminata Grande naine) roots. *Plant Physiology and Biochemistry*, *44*(5-6), 308-314.

Xiao, Y. Y., Chen, J. Y., Kuang, J. F., Shan, W., Xie, H., Jiang, Y. M., & Lu, W. J. (2013). Banana ethylene response factors are involved in fruit ripening through their interactions with ethylene biosynthesis genes. *Journal of experimental botany*, *64*(8), 2499-2510.

Yadav, V. K., Oury, F., Suda, N., Liu, Z. W., Gao, X. B., Confavreux, C. & Karsenty, G. (2009). A serotonin-dependent mechanism explains the leptin regulation of bone mass, appetite, and energy expenditure. *Cell*, *138*(5), 976-989.

Yang, Y., Jiang, M., Feng, J., Wu, C., Shan, W., Kuang, J. & Lu, W. (2021). Transcriptome analysis of low-temperature-affected ripening revealed MYB transcription factors-mediated regulatory network in banana fruit. *Food Research International*, *148*, 110616.

Yatoo, M., Gopalakrishnan, A., Saxena, A., Parray, O. R., Tufani, N. A., Chakraborty, S., ... & Iqbal, H. (2018). Anti-inflammatory drugs and herbs with special emphasis on herbal medicines for countering inflammatory diseases and disorders-a review. *Recent patents on inflammation & allergy drug discovery*, *12*(1), 39-58.

Yeung, Y. T., Aziz, F., Guerrero-Castilla, A., & Arguelles, S. (2018). Signaling pathways in inflammation and anti-inflammatory therapies. *Current pharmaceutical design*, *24*(14), 1449-1484.

Yu, H., Mei, S., Zhao, L., Zhao, M., Wang, Y., Zhu, H., ... & Peng, S. (2015). RGD-peptides modifying dexamethasone: to enhance the anti-inflammatory efficacy and limit the risk of osteoporosis. *MedChemComm*, *6*(7), 1345-1351.

Yuei, L. P., Singaram, N., & Hassan, H. (2016). Study of anti-inflammatory and analgesic activity of Musa spp. peel.

Zielonka, J., & Kalyanaraman, B. (2010). Hydroethidine-and MitoSOX-derived red fluorescence is not a reliable indicator of intracellular superoxide formation: another inconvenient truth. *Free Radical Biology and Medicine*, *48*(8), 983-1001.

Zhang P., Whistler RL, BeMiller JN, Hamaker BR. Banana starch: Production, physicochemical properties, and digestibility-A review Carbohydrate Polymers, 59(4)(2005), pp. 443-458

Zhao, H., Joseph, J., Fales, H. M., Sokoloski, E. A., Levine, R. L., Vasquez-Vivar, J., & Kalyanaraman, B. (2005). Detection and characterization of the product of hydroethidine and intracellular superoxide by HPLC and limitations of fluorescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *102*(16), 5727.

Zhu, F., Du, B., & Xu, B. (2018). Anti-inflammatory effects of phytochemicals from fruits, vegetables, and food legumes: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, *58*(8), 1260-1270.

Zou, P. (2016). Traditional Chinese medicine, food therapy, and hypertension control: a narrative review of Chinese literature. *The American journal of Chinese medicine*, *44*(08), 1579-1594

Site web: http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Fruits/banane.htm

States of America, *102*(16), 5727.

Zhu, F., Du, B., & Xu, B. (2018). Anti-inflammatory effects of phytochemicals from fruits, vegetables, and food legumes: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, *58*(8), 1260-1270.

Zou, P. (2016). Traditional Chinese medicine, food therapy, and hypertension control: a narrative review of Chinese literature. *The American journal of Chinese medicine*, *44*(08), 1579-1594

Site web: http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Fruits/banane.htm

United States of America, *102*(16), 5727.

Zhu, F., Du, B., & Xu, B. (2018). Anti-inflammatory effects of phytochemicals from fruits, vegetables, and food legumes: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, *58*(8), 1260-1270.

Zou, P. (2016). Traditional Chinese medicine, food therapy, and hypertension control: a narrative review of Chinese literature. *The American journal of Chinese medicine*, *44*(08), 1579-1594

Site web: http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Fruits/banane.htm

United States of America, *102*(16), 5727.

Zhu, F., Du, B., & Xu, B. (2018). Anti-inflammatory effects of phytochemicals from fruits, vegetables, and food legumes: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, *58*(8), 1260-1270.

Zou, P. (2016). Traditional Chinese medicine, food therapy, and hypertension control: a narrative review of Chinese literature. *The American journal of Chinese medicine*, *44*(08), 1579-1594

Site web: http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Fruits/banane.htm