

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



**ECOLE DOCTORALE SCIENCES DE LA VIE, DE LA SANTE
ET DE L'ENVIRONNEMENT (ED-SEV)**



FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

THÈSE DE DOCTORAT UNIQUE

Année : 2019

N° d'ordre : 201957

MENTION : BIOLOGIE, PRODUCTION ET PATHOLOGIES ANIMALES

SPECIALITE : ENTOMOLOGIE

Présentée par :

Déthié NGOM

**Caractéristiques morpho-physiques et biochimiques pour la sensibilité variétale du
maïs aux ravageurs des denrées stockées et interactions entre les insectes**

Soutenue le 06 mars 2020, devant le Jury composé de :

Président : M. Tahir Abdoulaye DIOP Professeur titulaire, UAM, Sénégal

Rapporteurs: Mme Marie-Laure FAUCONNIER Professeur titulaire, ULiège, Belgique

M. Thierry BREVAULT Directeur de recherches, CIRAD, France

M. Karamoko DIARRA Professeur titulaire, UCAD, Sénégal

Examineur: M. Toffène DIOME Maître-assistant, UCAD, Sénégal

Directeur de thèse: M. Mbacké SEMBENE Professeur titulaire, UCAD, Sénégal

Co-Directeur de thèse: M. Cheikh THIAW Maître de conférences, USSEIN, Sénégal

AVANT PROPOS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Entomologie et d'Acarologie de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (FST-UCAD, Sénégal) et à la Faculté Agronome Gembloux Agro Bio-Tech de l'Université de Liège (GxABT - ULiège, Belgique). Il s'est déroulé sous la direction et la supervision de :

Professeur Mbacké SEMBENE, Directeur de l'Ecole Doctorale Sciences de la Vie, de la Santé et de l'Environnement (ED-SEV) et Chef de l'équipe de recherche GENGESPOP de la FST (UCAD, Sénégal) ;

Professeur Cheikh THIAW, coordonnateur du CAMPUS et Directeur de l'UFR Agronomie et Production Végétale de l'Université du Sine Saloum El-Hâdj Ibrahima NIASS (USSEIN, Kaolack, Sénégal) ;

Professeur Marie-Laure FAUCONNIER, Chef du Laboratoire de Chimie organique et des Molécules Naturelles de Gembloux Agro Bio-Tech (GxABT - ULiège, Belgique).

Le travail a bénéficié d'une subvention de l'ED-SEV, de l'appui technique du Laboratoire de Chimie organique et des Molécules Naturelles (GxABT – ULiège), de TERRA Teaching and Research Center de Gembloux (GxABT – ULiège) et de GENGESPOP.

INMEMORIUM

*A mon feu oncle, **Cheikh THIAW**, qui nous a quittés très tôt. J'aurais bien aimé que vous assistiez à la concrétisation de ce travail, que vous avez tant soutenu et encouragé, mais hélas le bon Dieu en a décidé autrement. Que Dieu le Tout Puissant vous accueille dans son paradis. Amen !*

DEDICACES

Ce modeste travail est dédié :

✓ *A mes chers parents,*

✓ *A ma chère maman Yacine Keïta,*

Merci pour avoir toujours été à mes côtés, malgré les distances qui nous séparent parfois.

REMERCIEMENTS

Je rends grâce à **Allah**, le Tout Puissant et Miséricordieux, qui m'a non seulement donné les forces physique, morale et intellectuelle mais également la chance d'être encadré par des scientifiques hors paire.

Mes sincères remerciements vont à l'endroit du **Professeur Mbacké SEMBENE**. Je ne saurais vous exprimer ma reconnaissance pour les soutiens moraux, pédagogiques et financiers que vous m'avez apportés depuis ma licence. Si ce travail est arrivé à terme, c'est grâce à votre générosité et à vos encouragements. Vous avez toujours solutionné toute contrainte rencontrée durant ce travail. Je vous remercie pour votre confiance et pour la liberté que vous m'avez accordée dans la réalisation de cette thèse. Votre disponibilité et votre rigueur scientifique ont suscité tant d'espoirs en moi et m'ont permis de persévérer davantage, malgré les contraintes rencontrées durant ce travail. Merci pour m'avoir encadré et guidé sur le chemin du travail bien fait. Que le bon Dieu vous accorde une longue vie pleine de succès.

Je remercie le **Professeur Cheikh THIAW**, pour m'avoir pris et initié dans la recherche depuis mon Master dans son projet de recherche intitulé « Renforcement de la régulation écologique des insectes ravageurs de céréales sèches et cultures associées au Sénégal, "RECOR" ». Merci pour avoir eu la confiance en moi en me donnant ce sujet de thèse et pour tout le soutien financier et scientifique dans ce travail de thèse comme dans celui du Master. J'espère que ce travail sera à la hauteur de vos attentes. Qu'Allah vous préserve contre tout mal et vous accorde une longue vie.

Je remercie infiniment **Professeur Absa NDIAYE GUEYE**, pour nous avoir donné une bonne formation en Entomologie au cours de notre Master. Je vous remercie également pour avoir mis à ma disposition le laboratoire d'Entomologie, qui m'a permis de réaliser les manipulations et de rédiger cette thèse dans les meilleures conditions. Que le bon Dieu vous préserve et vous garde en vie pendant si longtemps.

Mes sincères remerciements vont également à l'endroit du **Professeur Marie-Laure FAUCONNIER**. Je vous témoigne toute ma reconnaissance et ma gratitude pour m'avoir accepté et accueilli au sein de votre Unité de Chimie des Molécules Naturelles de Gembloux Agro-Bio Tech. Merci pour avoir mis à ma disposition toutes les ressources permettant la réussite de ce travail. Vous n'avez ménagé aucun effort pour l'atteinte des objectifs fixés dans ce travail. J'espère que ce travail sera à la hauteur de vos attentes.

J'exprime toute ma gratitude aux éminents **membres de ce jury** qui ont accepté de juger et d'améliorer ce modeste travail par des contributions constructives et pertinentes pour une meilleure production. Je veux nommer:

Le Président : **Professeur Tahir Abdoulaye DIOP**, veuillez recevoir cher Professeur nos vifs remerciements pour avoir accepté de présider ce jury de thèse, malgré vos nombreuses responsabilités.

Les rapporteurs : **Professeur Thierry BREVAULT**, merci pour avoir accepté spontanément d'être rapporteur pour cette thèse et nous faire bénéficier de vos opinions très pertinentes. Je vous ai profondément reconnaissant de m'avoir pris et initié dans la recherche dans votre projet de recherche intitulé « Renforcement de la régulation écologique des insectes ravageurs de céréales sèches et cultures associées au Sénégal, "RECOR" », dans lequel j'ai rédigé et soutenu mon mémoire Master.

Professeur Karamoko DIARRA, mes sincères remerciements pour l'honneur que vous nous faites en siégeant dans le jury de cette thèse en tant que rapporteur. Je vous exprime également ma reconnaissance et gratitude pour les conseils, les encouragements et les lettres de recommandations.

Professeur Marie-Laure FAUCONNIER, merci d'avoir accepté d'être un des rapporteurs de cette thèse et d'y apporter davantage des contributions pertinentes.

L'examineur: Docteur Toffène DIOME, mes sincères remerciements pour avoir accepté de faire partie de ce jury en tant qu'examineur. Je vous adresse également mes remerciements pour le bon exemple que vous nous avez offert, de par vos compétences scientifiques avérées et de vos qualités humaines innombrables.

La réalisation de ce travail a été possible grâce aux soutiens et collaborations de nos partenaires. C'est le lieu pour moi de leurs témoigner toute ma reconnaissance.

Grand merci à l'**Ecole Doctorale Sciences de la Vie, de la Santé et de l'Environnement (ED-SEV)** pour avoir soutenu financièrement une partie de ce travail.

Grand Merci à l'**Université de Liège**, particulièrement à sa faculté agronome Gembloux Agro-Bio Tech pour sa collaboration sur l'analyse morpho-physique et chimique des grains de maïs.

J'exprime également mes remerciements à l'endroit de toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin aux collectes des échantillons, à la caractérisation des grains et à l'élaboration scientifique de ce travail, notamment :

Dr. Moustapha GUEYE du CNRA de Bambe. Merci pour votre entière collaboration dans la collecte des échantillons de variétés de maïs au niveau du service des semences du Centre national de recherches agronomiques (CNRA-Bambe).

Monsieur Issa CISSE, Directeur de la Coopérative des Producteurs de Semences d'Arachide et de Maïs (COPROSA-Nioro du Rip). Merci pour votre entière collaboration dans la collecte des variétés de maïs.

Dr Paul Kamba MALUMBA de TERRA Teaching and Research Center de Gembloux Agro Bio-Tech (Université de Liège). Merci pour le service technique rendu et la contribution scientifique précieuse dans l'orientation des analyses morpho-physiques et chimiques des grains de maïs. Merci également pour votre accueil chaleureux au sein du centre TERRA.

Messieurs Danny TRISMAN et Thomas BERTRAND de l'Unité de Chimie des Molécules Naturelles de Gembloux Agro Bio-Tech (Université de Liège). Merci pour l'accueil chaleureux et l'appui sans faille sur la caractérisation morpho-physique et chimique des grains de maïs. Vous avez pu m'apprendre toutes les techniques et approches en analyse chimique aux sacrifices de votre temps précieux. Ce travail est aussi le vôtre. Nous vous en témoignons notre gratitude.

Mesdames Vanessa ARDITO, Nathalie et Monsieur Romain (dit Gamin) de TERRA Teaching and Research Center de Gembloux Agro Bio-Tech (Université de Liège). Merci pour l'accueil chaleureux au centre TERRA et pour votre appui sans faille sur la caractérisation morpho-physique et chimique des grains de maïs. Nous vous en sommes sincèrement reconnaissants.

Je remercie également **Dr Dogo Sèck** pour la recommandation à Gembloux Agro Bio-Tech, **Dr Sophie GLADIMA** (Ministre des Mines et de la Géologie du Sénégal) pour son soutien, **Mrs Abdoulaye Thiam** pour l'accueil et les moments forts passés ensemble à Gembloux, et à **Maayoufi Saïd** pour la générosité et le soutien précieux que vous m'avez apporté à Gembloux.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de tous les membres de l'Unité de Chimie des Molécules Naturelles de Gembloux Agro Bio-Tech (Université de Liège) pour leur accueil chaleureux et leurs appuis technique, scientifique et social. Je veux nommer **Mrs Franck Michels, Thierry Kene, Mmes Evelyne Tanoh, Fatimata Nea, Fabienne Piscart, ...**

J'exprime également mes vifs remerciements à tous les membres du Service Social de Gembloux Agro Bio-Tech, particulièrement aux **Mesdames Françoise Decamp, Joëlle Haine** (Service d'Aide à la Vie Etudiante et logement à la faculté) et **Michelle MOREAU-VAN MARSENILLE** (Service d'Aide au logement Ville) pour l'appui social et administratif, ainsi que pour l'accueil et l'accompagnement précieux à Gembloux.

J'adresse également mes sincères remerciements à mes collègues de l'**Equipe de Recherche GENGESPOP**, pour leur dévouement dans l'instauration d'un cadre propice à des échanges féconds et à une recherche de qualité. Grace au management et au leadership de son **Responsable, Pr Mbacké SEMBENE** et de son **Adjoint, Pr Cheikh THIAW**, les activités pédagogiques et scientifiques de l'équipe se déroulent toujours à merveille dans le respect réciproque et de la hiérarchie. Je remercie **Drs Toffène DIOME, Fatimata MBAYE, Ndeye Penda NDIAYE, Khadim KÉBÉ, Arame NDIAYE, Awa NDIAYE, Amy Collé GUEYE, Ange KAFOM, Mama Racky NDIAYE, Cheikh Abdou Khadre Mbacké DIA, Adiouma Georges Robert Jacques SARR, Ahmadou SOW, Mmes Binta KENEME, Maggie Angéla Rosalina Gbéhodé AIZAN, Mrs Ibrahima SEMBENE** (informaticien de l'équipe GENGESPOP), **Ameth DIAGNE, Babacar Souleymane SAMB, Bakary NDIAYE, Jessika ISSA, Ngagne Demba SARR, Gorgui DIOUF,...** ainsi que tous les **étudiants en Master 2**.

Je remercie chaleureusement mes chers amis et/ou camarades de promotion, **Mrs Falilou Ndiaye, Tamsir Fall et Bassirou Thiam**, que j'ai eus la chance de connaître depuis les cycles secondaire et supérieur. Grand merci également aux **Mrs Mouhamadou Makhtar Diop et Moustapha Ndiaye**, aux **Drs El hadji Sérigne Sylla, Papa Seyni Cissokho et Ngagne Demba Tine**, pour vos conseils précieux et soutiens inestimables.

C'est également l'occasion pour moi d'exprimer un très grand merci à **ma famille**. Je commencerai mes remerciements par mon **Père** et ma **Mère**, pour l'éducation, les soutiens moraux et financiers indéfectibles et pour l'affection incommensurable dont vous avez toujours su nous inonder. Merci cher oncle **Babacar THIAW**, pour votre soutien moral et financier durant mon cursus scolaire. A tous les membres de ma famille qui ont toujours cru en moi, merci infiniment d'avoir toujours été à mes côtés malgré les distances qui nous séparent parfois, particulièrement à oncle **Mass Thiaw, Maty Ngom, Latyr Ngom, Mame Diarra Sène, Ablaye Sène, Cheikh Tine, Mbissane Tine,...** Puissiez-vous trouver dans ce travail la consécration de vos vœux.

*Je remercie du fond du cœur ma très chère **famille Thiamène (Thiès)**. Si je suis arrivé à ce niveau c'est grâce à cette merveilleuse famille qui m'avait accueilli et donné tous les privilèges et le cadre propice pour une réussite dans mes études aux cycles moyen et secondaire. Je commencerai mes sincères remerciements par mon oncle **Yoro Thiam**, qui m'avait accepté chez lui et traité comme ses fils. A ma chère maman **Yacine Keïta (Mme Thiam)**, qui se souciait sans cesse de mon bien être, se levait tôt le matin tous les jours pour préparer le petit déjeuner afin que je puisse manger avant d'aller à l'école, je ne saurais vous exprimer ma reconnaissance. Grand merci à mes oncles **Pape Thiam** et **Ibrahima Thiam**, à mes tantes **Astou Diop Thiam**, **Awa Ndiaye Thiam**,... Mes vifs remerciements à tous les membres de la famille Thiamène élargie que je ne pourrais pas citer ici : **Alioune Badara Thiam**, **Ahmeth Thiam**, **Cheikh Omar Thiam**, **Ibrahima Thiam**, **ma chère sœur Aïcha Thaim**, **Ndongó Diaw**, **Mbaye Diaw**, **Ndiarré Thiam**, **Amy Thiam**,... A feu grande mère, **Mame Boy Fall**, que Dieu le Tout Puissant l'accueille dans son paradis. Amen ! Puissiez-vous trouver dans ce travail la consécration de vos vœux.*

A mes chers amis et camarades de promotion, merci pour vos conseils et soutiens !!!

A tous ceux que je n'ai pu citer ici et qui m'ont soutenu de près ou de loin, merci à vous tous !!!

Résumé

Le maïs (*Zea mays* L.) est l'un des aliments de base les plus importants dans plusieurs régions d'Amérique et d'Afrique Sub-Saharienne, où il est conservé pour servir de nourriture et couvrir les périodes de soudure. Le charançon, *Sitophilus zeamais* M. et le grand capucin, *Prostephanus truncatus* H. constituent les insectes ravageurs les plus redoutables du maïs entreposé. Ces Coléoptères peuvent engendrer des pertes supérieures à 20 % sur le maïs. La protection des denrées stockées est l'un des facteurs essentiels contribuant à la sécurité alimentaire et nutritionnelle. Cette étude vise à identifier des variétés de maïs susceptibles de résister aux attaques de ces insectes et à expliquer le mécanisme morpho-physique et biochimique qui est à l'origine de cette résistance variétale. Neuf variétés de maïs très prisées au Sénégal ont fait l'objet de tests au laboratoire pour évaluer leur niveau de sensibilité aux attaques de *S. zeamais* et de *P. truncatus*. Les paramètres liés aux caractéristiques morphologiques, physiques et biochimiques des grains ont été évalués et corrélés aux paramètres de sensibilité variétale. L'indice de susceptibilité de Dobie (IS), indicateur majeur de la résistance des grains aux insectes, révèle une sensibilité des variétés plus élevée à *S. zeamais* (IS variant de $6,09 \pm 0,29$ à $13,51 \pm 1,12$) qu'à *P. truncatus* (IS variant de $2,85 \pm 0,78$ à $9,76 \pm 0,24$). La variété la plus résistante contre *S. zeamais* est SWAN. Inversement, Obatampa, Synth-C et Synth-9243 sont les variétés les plus sensibles à cette espèce. Le potentiel de reproduction du charançon est significativement différent sur les variétés et SWAN représente l'hôte le moins favorable. Pour *P. truncatus*, les variétés les plus résistantes sont Early-Thaï, DMR-ES et Tzee-Yellow, contrairement à Synth-9243, Obatampa et Synth-C qui sont les plus sensibles pour cette espèce. Les capacités reproductives de l'insecte diffèrent significativement entre les variétés avec Early-Thaï, DMR-ES et Tzee-Yellow comme les hôtes les moins favorables.

Les paramètres morpho-physiques et biochimiques des grains ont été évalués selon des méthodes normalisées. L'analyse des liaisons indique que la sensibilité (IS) du maïs au charançon est liée aux polyphénols ($\rho = -0,693^{***}$), à la dureté ($\rho = -0,510^{**}$) et à l'acide palmitique ($\rho = 0,659^{***}$) des grains. La descendance de l'insecte en F₁ est négativement affectée par les polyphénols, la couleur jaune, la dureté et positivement liée à l'acide palmitique, à la couleur blanche et aux protéines des grains. En ce qui concerne *P. truncatus*, l'indice de sensibilité du maïs est lié à l'amylose ($\rho = -0,577^{**}$), à la couleur jaune ($\rho = -0,538^{**}$), aux polyphénols ($\rho = -0,451^*$), à l'acide palmitique ($\rho = 0,475^*$) et au volume ($\rho = 0,405^*$) des grains. Ses émergences F₁ sont négativement affectées par la couleur jaune, la pureté de la couleur, l'amylose et la dureté, et positivement liées à l'acide palmitique et au volume des grains. Le niveau d'attaque des grains n'est affecté significativement que par les teneurs en acide béhénique ($\rho = -0,575^{**}$) et en protéines ($\rho = 0,394^*$) des grains. Le maïs le plus résistant contre *P. truncatus* peut être décrit comme une variété à grains durs avec des teneurs élevées en amylose et en polyphénols. Quant au maïs résistant contre *S. zeamais*, la teneur élevée en polyphénols et les grains durs sont les principaux indicateurs. La sensibilité de la variété à l'infestation de ces espèces augmente fortement avec la teneur en acide palmitique de ses grains.

Mots clés: Sénégal ; *Zea mays* ; Stockage ; Ravageurs post-récolte ; Résistance physico-chimique.

Abstract

Maize (*Zea mays* L.) is one of most important staple foods in many regions of America and sub-Saharan Africa, where it is a food resource and used to cover lean periods. The maize weevil (MW), *Sitophilus zeamais* M. and the larger grain borer (LGB), *Prostephanus truncatus* H. are the majors insects pests of stored maize. These beetles can cause losses greater than 20% on maize. Protection of stored food is one of majors factors contributing to food and nutrition security. This study aims to identify maize varieties that can minimize these insects attacks and to explain morpho-physical and biochemical mechanism of this varietal resistance. Nine maize varieties extensively taken in Senegal were tested in laboratory to assess their susceptibility to attack and reproductive behavior of *S. zeamais* and *P. truncatus*. The parameters related to morphological, physical and biochemical characteristics of grains were evaluated and correlated with susceptibility parameters.

The Dobie susceptibility index (SI), major indicator of grain resistance to insects, reveals higher susceptibility of varieties to MW (SI from 6.09 ± 0.29 to 13.51 ± 1.12) than LGB (SI from 2.85 ± 0.78 to 9.76 ± 0.24). The most resistant variety against MW is SWAN. Conversely, Obatampa, Synth-C and Synth-9243 are the most susceptible varieties to this species infestation. The reproductive potential of MW is significantly different on varieties and SWAN being the least favorable host. For LGB, the most resistant varieties are Early-Thai, DMR-ES and Tzee-Yellow, whereas Synth-9243, Obatampa and Synth-C are the most susceptible varieties for this species. The reproductive capacity of this insect differs significantly between varieties with Early-Thai, DMR-ES and Tzee-Yellow the least favorable hosts.

The grains morpho-physical and biochemical parameters were evaluated according to standardized methods. Correlations analyses indicates maize susceptibility (SI) to MW is related to phenolics ($\rho = -0.693^{***}$), hardness ($\rho = -0.510^{**}$) and to palmitic acid ($\rho = 0.659^{***}$) of grains. F₁ progeny emerged are negatively affected by phenolics, yellow color, hardness and positively related to palmitic acid, white color and proteins of grains. For LGB, maize susceptibility index is related to amylose ($\rho = -0.577^{**}$), yellow color ($\rho = -0.538^{**}$), phenolics ($\rho = -0.451^*$), palmitic acid ($\rho = 0.475^*$) and volume ($\rho = 0.405^*$) of grains. Its emergences in F₁ are negatively affected by yellow color, color purity, amylose and hardness, and positively related to palmitic acid and volume of the grains. The percent of grains attacked is only significantly affected with the behenic acid ($\rho = -0.575^{**}$) and protein ($\rho = 0.394^*$) contents of grains.

The most resistant maize against *P. truncatus* can be described as a variety with hard grain and highs amylose and polyphenols contents. As for maize resistant against *S. zeamais*, high content of polyphenols and hard grains are main indicators. Variety susceptibility by these species increases with palmitic acid content of its grains.

Key Words: Senegal, *Zea mays*, Storage, Postharvest pests, Physicochemical resistance

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP	: Analyse en Composantes Principales
AFD	: Analyse Factorielle Discriminante
Cnm	: Capacité nette de multiplication
Dmd	: Durée moyenne de développement
D.O	: Densité Optique
Eff	: Effectif des descendants F ₁
FAME	: Fatty Acid Methyl Esters
GC-FID	: Chromatographie en Phase Gazeuse couplée à un Détecteur à Ionisation de Flamme
HPLC	: Chromatographie en Phase Liquide à Haute Performance
H.R.	: Humidité Relative
IS	: Indice de susceptibilité de Dobie
LC	: Chromatographie en Phase Liquide
MS	: Spectrométrie de Masse
SE	: Standard d'Erreur
Ta/s	: Taux d'accroissement par semaine
Tm/♀	: Taux de multiplication par femelle
UV	: Ultra-violet

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

AFNOR	: Association française de normalisation
ANSD	: Agence National de la Statistique et de la Démographie.
AOAC	: Association of Official Analytical Chemists
CEEMAT	: Centre d'Etudes et d'Expérimentation du Machinisme Agricole Tropical
CIMMYT	: Centre International d'Amélioration du Maïs et du Blé
CIRAD	: Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CNRA	: Centre National de Recherches Agronomiques
COPROSA	: Coopérative des Producteurs de Semences d'Arachide et de Maïs de Paoskoto
CSA	: Commissariat à la Sécurité Alimentaire
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
FAOSTAT	: Food and Agriculture Organization Statistical
GENGESPOP	: Génétique et la Gestion des Populations
GIE	: Groupement d'Intérêt Economique
GMD	: Grands Moulins de Dakar
ISRA	: Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
ITA	: Institut de Technologie Alimentaire
NMA	: Nouvelle Minoterie Africaine
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
PCE	: Projet de Croissance Economique de l'USAID
PNUE	: Programme des Nations Unies pour l'Environnement
UE	: Union Européenne
USAID	: United States Agency for International Development

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Coupe longitudinale et types de grain de maïs.....	10
Figure 2 : Plante de maïs.....	13
Figure 3 : Adulte de <i>Sitophilus zeamais</i> M.....	27
Figure 4 : Dégâts causés par <i>S. zeamais</i> sur les grains de maïs	30
Figure 5 : Adulte de <i>Prostephanus truncatus</i> H.....	31
Figure 6 : Dégâts causés par <i>P. truncatus</i> sur les grains de maïs	33
Figure 7 : Dispositif de criblage variétal au laboratoire	45
Figure 8 : Dispositif expérimental pour le test de germination	47
Figure 9 : Dispositif expérimental de test de préférence variétale des insectes	48
Figure 10 : Dispositif de sélection des grains pour l'oviposition	49
Figure 11 : Répartition des émergences en F ₁ de <i>S. zeamais</i> selon les variétés.....	51
Figure 12 : Corrélation entre le nombre d'individus émergés et les pertes	54
Figure 13 : Répartition des émergences en F ₁ de <i>P. truncatus</i> selon les variétés.....	55
Figure 14 : Corrélation entre le nombre d'individus émergés et les pertes	58
Figure 15: Taux de germination des grains attaqués	60
Figure 16 : Dynamique des populations des espèces sur la même ressource alimentaire. 63	
Figure 17 : Populations des espèces combinées et isolées.....	64
Figure 18 : Choix des grains hôtes pour l'oviposition de <i>S. zeamais</i>	65
Figure 19 : Choix des grains hôtes pour l'oviposition de <i>P. truncatus</i>	66
Figure 20 : Mesures des paramètres de taille des grains de maïs.....	79
Figure 21 : Spectrocolorimètre de détermination des couleurs des grains	81
Figure 22 : Moulin à micro-marteau (Culatti) évaluant la dureté des grains	82
Figure 23 : Spectrophotomètre de mesure des polyphénols (D.O.) des grains.....	85
Figure 24 : Dispositif de l'analyse qualitative des acides phénoliques par HPLC	87
Figure 25 : Dispositif pour la mesure des matières grasses selon la méthode Foch.....	88
Figure 26 : Dispositif de GC-FID de l'analyse des acides gras	90
Figure 27 : Dispositif expérimental de Dumas pour l'évaluation des protéines.....	92
Figure 28 : Polarimètre de mesure de l'amidon total.....	93
Figure 29 : Volume moyen des grains des variétés de maïs	95
Figure 30 : Poids moyen des grains des variétés de maïs.....	96
Figure 31 : Densité moyenne des grains des variétés de maïs	97
Figure 32 : Tracés spectraux des longueurs d'onde.....	98
Figure 33 : Durée de broyage des grains de maïs (dureté des grains)	100
Figure 34 : Teneur en eau des grains des variétés de maïs.....	101
Figure 35 : Courbe d'étalonnage de l'acide gallique	102
Figure 36 : Teneurs en polyphénols totaux des différentes variétés de maïs	103
Figure 37 : Teneurs en protéines des variétés de maïs	104
Figure 38 : Teneur en amidon total des variétés de maïs.....	105
Figure 39 : Courbe d'étalonnage de standard megazyme.....	106
Figure 40 : Teneur en amylose des amidons des variétés de maïs	106
Figure 41 : Teneurs en matières grasses (huiles) des variétés de maïs.....	107
Figure 42 : Chromatogramme des acides gras.....	108

Figure 43 : Chromatogramme du mélange d'acides férulique et p-coumarique	110
Figure 44 : Absorbances (a) et courbe d'étalonnage à $\lambda_{\max} = 310$ (b) de l'acide férulique	111
Figure 45 : Teneur en acide férulique des variétés de maïs	112
Figure 46 : Absorbances (a) et courbe d'étalonnage à $\lambda_{\max} = 320$ (b) de l'acide p-coumarique	113
Figure 47 : Teneur en acide p-coumarique des variétés de maïs	113
Figure 48 : ACP des paramètres de sensibilité à <i>S. zeamaïs</i> et morphophysiques des grains	128
Figure 49 : AFD des variétés sur la base des paramètres morfo-physiques des grains	129
Figure 50 : ACP des paramètres de sensibilité à <i>S. zeamaïs</i> et biochimiques des grains..	133
Figure 51 : AFD des variétés sur la base des composés biochimiques	134
Figure 52 : ACP des paramètres de sensibilité à <i>S. zeamaïs</i> , morphophysiques et biochimiques des grains	138
Figure 53 : AFD des variétés sur la base des paramètres morfo-physiques et biochimiques.....	139
Figure 54 : ACP des paramètres de sensibilité à <i>P. truncatus</i> et morphophysiques des grains.....	142
Figure 55 : AFD des variétés sur la base des paramètres morfo-physiques.....	143
Figure 56 : ACP des paramètres de sensibilité à <i>P. truncatus</i> et biochimiques des grains	147
Figure 57 : AFD des variétés sur la base des composés biochimiques.....	148
Figure 58 : ACP des paramètres de sensibilité à <i>P. truncatus</i> , morphophysiques et biochimiques des grains	152
Figure 59 : AFD des variétés sur la base des paramètres morfo-physiques et biochimiques.....	153

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Variétés de maïs homologuées et cultivées au Sénégal.....	43
Tableau 2 : Caractéristiques de performances de <i>S. zemaïs</i> vis-à-vis des variétés.....	52
Tableau 3 : Caractéristiques de sensibilité des grains à l'attaque de <i>S. zemaïs</i>	53
Tableau 4 : Matrice de corrélations entre les paramètres de sensibilité.....	54
Tableau 5 : Caractéristiques de performances de <i>P. truncatus</i> vis-à-vis des variétés	56
Tableau 6 : Paramètres de sensibilité des grains à l'attaque de <i>P. truncatus</i>	57
Tableau 7 : Matrice de corrélations entre les paramètres de sensibilité.....	58
Tableau 8 : Taux de germination des grains sains et attaqués pour chaque variété	59
Tableau 9 : Dynamique des adultes et de la reproduction de <i>S. zemaïs</i> en choix libre.....	61
Tableau 10 : Dynamique des adultes et de reproduction de <i>P. truncatus</i> en libre choix.....	62
Tableau 11 : Paramètres de couleurs des grains	99
Tableau 12 : Matrice de corrélations des paramètres morpho-physiques des grains	100
Tableau 13 : Composition en acides gras des matières grasses de la farine de maïs (%)	109
Tableau 14 : Matrice de corrélations des paramètres biochimiques du maïs	114
Tableau 15 : Matrice de corrélations des paramètres morpho-physiques et biochimiques du maïs	115
Tableau 16 : Matrice de corrélations des paramètres de sensibilité et physique	126
Tableau 17 : Matrice de corrélations des paramètres de sensibilité et morphologique ..	127
Tableau 18 : Matrice de corrélations des paramètres de sensibilité et composés biochimiques complexes	130
Tableau 19 : Matrice de corrélations des paramètres de sensibilité et composés biochimiques individuels	131
Tableau 20 : Matrice de corrélations des paramètres de sensibilité, morpho-physique et biochimiques.....	136
Tableau 21 : Matrice de corrélations des paramètres physiques et de sensibilité.....	140
Tableau 22 : Matrice de corrélations des paramètres morphologique et de sensibilité ..	140
Tableau 23 : Matrice de corrélation des paramètres de sensibilité et de composés complexes.....	144
Tableau 24: Matrice de corrélation des paramètres de sensibilité et composés individuels	145
Tableau 25 : Matrice de corrélations des paramètres de sensibilité, morpho-physiques et biochimiques.....	150

TABLES DES MATIÈRES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	7
I.1 Maïs : <i>Zea mays</i>	7
I.1.1 Origine, distribution et production	7
I.1.2 Description morphologique et classification.....	8
I.1.2.1 Morphologie de la plante de maïs.....	8
I.1.2.2 Morphologie du grain de maïs	9
I.1.3 Taxonomie et variétés	10
I.1.4 Biologie et mode de reproduction du maïs	11
I.1.5 Intérêts économiques et agronomiques.....	13
I.1.6 Valeur nutritionnelle et utilisation du maïs.....	14
I.1.7 Composition chimique des grains de maïs.....	16
I.1.8 Maïs au Sénégal.....	19
I.1.9 Importance du stockage de maïs au Sénégal	20
I.2 Principaux ravageurs du maïs	20
I.2.1 Organisation des insectes	21
I.2.1.1 Organisation externe des insectes.....	21
I.2.1.2 Organisation interne des insectes	22
I.2.2 Insectes ravageurs de la culture du maïs	23
I.2.3 Insectes ravageurs du maïs stocké.....	24
I.2.4 Coléoptères.....	25
I.2.4.1 <i>Sitophilus zeamais</i> (Motschulsky).....	26
I.2.4.1.1 Origine et distribution	26
I.2.4.1.2 Description morphologique et taxonomie.....	27
I.2.4.1.3 Bio-écologie	28
I.2.4.1.4 Nature des dégâts et importance économique	29
I.2.4.2 <i>Prostephanus truncatus</i> (Horn)	30
I.2.4.2.1 Origine et distribution	30
I.2.4.2.2 Description morphologique et taxonomie.....	31
I.2.4.2.3 Bio-écologie	32
I.2.4.2.4 Nature des dégâts et importance économique	33
I.3 Méthodes de lutte contre les insectes des stocks.....	34
I.3.1 Méthodes traditionnelles	34
I.3.1.1 La prévention	34
I.3.1.2 Procédés physico-mécaniques.....	34
I.3.1.3 Utilisation des substances végétales	34
I.3.2 Méthodes modernes.....	35
I.3.2.1 Lutte biologique.....	35
I.3.2.2 Lutte physique	36
I.3.2.3 Lutte chimique	36
I.3.2.4 Résistance variétale	37
I.3.2.4.1 Notion et concepts.....	37
I.3.2.4.2 Définition des termes de la résistance variétale	38

CHAPITRE II : SENSIBILITE VARIETALE AUX DEUX RAVAGEURS MAJEURS DU MAÏS STOCKE ET COMPORTEMENT REPRODUCTIF DE CES ESPECES.....	40
INTRODUCTION	41
II.1 Matériel et Méthodes	42
II.1.1 Matériel	42
II.1.1.1 Matériel végétal	42
II.1.1.2 Insectes	44
II.1.2 Méthodes	44
II.1.2.1 Criblage variétal pour la sensibilité du maïs aux attaques des insectes.....	44
II.1.2.2 Evaluation du pouvoir germinatif des grains attaqués.....	46
II.1.2.3 Evaluation de la préférence variétale des insectes (tests choix libre)	47
II.1.2.4 Compétition interspécifique.....	48
II.1.2.5 Tolérance interspécifique (Sélection de grains hôtes).....	49
II.1.3 Analyses statistiques.....	49
II.2 Résultats et discussion	50
II.2.1 Sensibilité variétale du maïs	50
II.2.1.1 Sensibilité du maïs vis-à-vis de <i>S. zeamaïs</i>	50
II.2.1.1.1 Effectif de la descendance F ₁ (Eff) de <i>S. zeamaïs</i>	50
II.2.1.1.2 Dynamique de la reproduction de <i>S. zeamaïs</i> en F ₁	51
II.2.1.1.3 Paramètres de sensibilité des variétés aux attaques de <i>S. zeamaïs</i>	52
II.2.1.1.4 Proportion des pertes en fonction du nombre de <i>S. zeamaïs</i> émergés.....	53
II.2.1.1.5 Analyses de corrélations entre les paramètres évalués	54
II.2.1.2 Sensibilité variétale du maïs vis-à-vis de <i>P. truncatus</i>	55
II.2.1.2.1 Effectif de la descendance en F ₁ (Eff) de <i>P. truncatus</i>	55
II.2.1.2.2 Dynamique de la reproduction de <i>P. truncatus</i> en F ₁	56
II.2.1.2.3 Paramètres de sensibilité des variétés aux attaques de <i>P. truncatus</i>	56
II.2.1.2.4 Proportion des pertes en fonction du nombre de <i>P. truncatus</i> émergés	57
II.2.1.2.5 Analyses de corrélations entre les paramètres évalués	58
II.2.2 Taux de germination des grains de maïs attaqués	59
II.2.3 Préférence variétale des insectes (choix libre)	60
II.2.3.1 Préférence variétale de <i>S. zeamaïs</i>	60
II.2.3.2 Préférence variétale de <i>P. truncatus</i>	61
II.2.4 Compétition interspécifique des deux espèces	62
II.2.5 Tolérance interspécifique	64
II.2.5.1 Sélection de grains hôtes pour l'oviposition de <i>S. zeamaïs</i>	64
II.2.5.2 Sélection de grains hôtes pour l'oviposition de <i>P. truncatus</i>	65
II.3 Discussion.....	66
CONCLUSION PARTIELLE	74

CHAPITRE III : CARACTERISTIQUES MORPHO-PHYSIQUES ET BIOCHIMIQUES DES GRAINS DES DIFFERENTES VARIÉTÉS DE MAÏS	76
INTRODUCTION	77
III.1 Matériel et méthodes	78
III.1.1 Caractérisation morpho-physique des grains.....	78
III.1.1.1 Mesures de la taille et du volume des grains	78
III.1.1.2 Mesure du poids des grains	79
III.1.1.3 Calcul de la densité des grains.....	79
III.1.1.4 Caractérisation de la couleur des grains (CIE L*a*b*)	79
III.1.1.5 Evaluation de la dureté des grains.....	81
III.1.2 Caractérisation biochimique des grains.....	82
III.1.2.1 Evaluation de la teneur en eau des gains (H.R).....	83
III.1.2.2 Evaluation des polyphénols.....	83
III.1.2.2.1 Dosage des polyphénols totaux.....	83
III.1.2.2.2 Identification et quantification des acides férulique et p-coumarique	85
III.1.2.3 Evaluation de la matière grasse	87
III.1.2.3.1 Mesure de la matière grasse.....	87
III.1.2.3.2 Analyse de la matière grasse et caractérisation des acides gras.....	89
III.1.2.4 Evaluation des protéines du maïs	90
III.1.2.5 Mesure de l'amidon total	92
III.1.2.6 Mesure de l'amylose présent dans l'amidon total.....	94
III.1.2.7 Analyses statistiques	94
III.2 Résultats et discussion	95
III.2.1 Caractéristiques morpho-physiques	95
III.2.1.1 Taille et volume des grains	95
III.2.1.2 Poids des grains.....	96
III.2.1.3 Densité des grains.....	96
III.2.1.4 Paramètres de couleur des grains.....	97
III.2.1.5 Dureté des grains	99
III.2.1.6 Matrice de corrélation entre paramètres morpho-physiques.....	100
III.2.2 Caractéristiques biochimiques.....	101
III.2.2.1 Teneur en eau des gains (H.R).....	101
III.2.2.2 Polyphénols totaux.....	101
III.2.2.3 Protéines	103
III.2.2.4 Amidon total	104
III.2.2.5 Quantité d'amylose dans l'amidon (Amylose/Amylopectine)	105
III.2.2.6 Matières grasses / teneurs en huiles.....	107
III.2.2.7 Acides gras constitutifs des matières grasses des grains.....	107
III.2.2.8 Teneurs en acides férulique et para-coumarique du grain	110
III.2.2.8.1 Acide férulique.....	111
III.2.2.8.2 Acide p-coumarique	112
III.2.2.9 Matrice de corrélation des paramètres biochimiques.....	114
III.3 Matrice de corrélation entre paramètres morpho-physiques et biochimiques..	114
III.4 Discussion.....	116

CONCLUSION PARTIELLE	120
CHAPITRE IV : EFFETS DES CARACTERISTIQUES MORPHO-PHYSIQUES ET BIOCHIMIQUES DES GRAINS DE MAÏS SUR LA SENSIBILITE VARIETALE	121
INTRODUCTION	122
IV.1 Matériel et méthodes	123
IV.1.1 Echantillons (données)	123
IV.1.2 Analyses statistiques.....	123
IV.1.2.1 Analyses en Composantes Principales (ACP).....	124
IV.1.2.2 Analyses Factorielles Discriminantes (AFD).....	125
IV.2 Résultats.....	126
IV.2.1 Variabilités inter-variétales aux risques d'infestation par <i>S. zeamais</i>	126
IV.2.1.1 Liaisons entres les paramètres de sensibilité et morpho-physique	126
IV.2.1.1.1 Matrice de corrélations entre paramètres physique et de sensibilité	126
IV.2.1.1.2 Matrice de liaisons entre paramètres morphologique et de sensibilité..	126
IV.2.1.1.3 Analyses en Composantes Principales (ACP)	127
IV.2.1.1.4 Analyses Factorielles Discriminantes (AFD).	128
IV.2.1.2 Corrélations entres les paramètres de sensibilité et biochimique	130
IV.2.1.2.1 Matrice de liaisons des paramètres de sensibilité aux composés biochimiques complexes.....	130
IV.2.1.2.2 Matrice de liaisons des paramètres de sensibilité aux composés biochimiques individuels.....	130
IV.2.1.2.3 Analyses en Composantes Principales (ACP)	131
IV.2.1.2.4 Analyses Factorielles Discriminantes (AFD)	133
IV.2.1.3 Liaisons entres paramètres de sensibilité, morpho-physique et biochimiques.....	134
IV.2.1.3.1 Matrice de liaisons des variables.....	134
IV.2.1.3.2 Analyses en Composantes Principales (ACP)	137
IV.2.1.3.3 Analyses Factorielles Discriminantes (AFD)	138
IV.2.2 Variabilités inter-variétales aux risques d'infestation par <i>P. truncatus</i>	139
IV.2.2.1 Corrélations entres les paramètres de sensibilité et morpho-physique..	139
IV.2.2.1.1 Matrice de liaisons entre paramètres physique et de sensibilité	139
IV.2.2.1.2 Matrice de liaisons entre paramètres morphologique et de sensibilité..	140
IV.2.2.1.3 Analyses en Composantes Principales (ACP)	141
IV.2.2.1.4 Analyses Factorielles Discriminantes (AFD)	142
IV.2.2.2 Corrélations entres les paramètres de sensibilité et biochimique	143
IV.2.2.2.1 Matrice de liaisons des paramètres de sensibilité aux composés complexes	143
IV.2.2.2.2 Matrice de liaisons des paramètres de sensibilité aux composés individuels	144
IV.2.2.2.3 Analyses en Composantes Principales (ACP)	145
IV.2.2.2.4 Analyses Factorielles Discriminantes (AFD)	147
IV.2.2.3 Liaisons entres paramètres de sensibilité, morpho-physique et biochimiques.....	149

IV.2.2.3.1 Matrice de liaisons entre les paramètres de sensibilité, morpho-physique et biochimiques.....	149
IV.2.2.3.2 Analyses à Composantes Principales (ACP).....	151
IV.2.2.3.3 Analyses Factorielles Discriminantes (AFD)	152
IV.3 Discussion.....	153
CONCLUSION PARTIELLE	164
CONCLUSION GENERALE.....	165
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	168
ANNEXES	a
Annexe 1: Chromatogrammes des acides gras	a
Annexe 2 : absorbance à trois longueurs d'onde ($\lambda = 290$ nm, $\lambda = 320$ nm et $\lambda = 320$ nm) des acides férulique et p-coumarique.....	c
Annexe 3 : Communications scientifiques.....	f
Annexe 4: Publications scientifiques.....	g

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

La sécurité alimentaire et nutritionnelle est définie comme étant un accès physique ou disposition d'un pouvoir d'achat suffisant à tout moment à une nourriture suffisante, saine et nutritive permettant une satisfaction des besoins énergétiques et des préférences alimentaires (FAO *et al.*, 2013). La sécurité alimentaire et nutritionnelle dans le monde constitue l'un des principaux défis du XXI^{ème} siècle (FAO *et al.*, 2015). Ce défi est confronté à des contraintes telles que les pertes pré et poste-récolte élevées, la fluctuation des prix des denrées alimentaires et la baisse récurrente du taux de croissance de la production céréalière mondiale. Ce taux de croissance passe de 9,9% à 0,6% entre 2013 et 2017, soit 9,9 % ; 1,8 % ; -1,3 % ; 3,0 % et 0,6 % en 2013, 2014, 2015, 2016 et 2017, respectivement (FAO, 2018). De 2007 à 2016, il reste faible et tourne au tour de 2,3 % en moyenne (FAO, 2018). Cette régression, qui serait déclenchée par l'avènement de la crise économique et financière de 2007/2008, accentue l'augmentation globale des prix des denrées alimentaires et réduit le pouvoir d'achat des consommateurs (Benz *et al.*, 2010). Cette situation affecte plus les pays en développement, notamment ceux de l'Afrique, qui doivent s'orienter davantage vers une production agricole suffisante et une conservation efficace des récoltes afin de réduire leur dépendance aux marchés internationaux (Dièye, 2011). Cependant, le secteur agricole africain, destiné à assurer la majeure partie des denrées alimentaires de base, la source de subsistance et de revenus des populations rurales, assume de plus en plus difficilement ses missions (Berthelier & Lipchitz, 2005). Depuis plus d'une décennie, l'insuffisance des denrées alimentaires et la chute de revenus des populations ont connu une hausse notable en Afrique, entraînant une augmentation de la sous-alimentation dans cette zone (FAO, 2018). Par exemple, en Afrique Subsaharienne, la FAO (2013) estime qu'une personne sur quatre souffre de la faim, soit 24,8 % de la population. Cette situation peut être expliquée par la sécheresse, l'appauvrissement des sols, la mauvaise qualité des semences, le manque de performances des systèmes de stockage, de transformation et surtout par les pertes pré et post-récoltes élevées. Dans ce contexte, des politiques destinées à accroître la productivité agricole et la bonne conservation des récoltes s'imposent afin de subvenir aux besoins en nourriture des populations grandissantes (Bell & Mück, 1997). Trois stratégies sont envisageables devant une telle situation selon Delobel et Tran (1993) ; soit ralentir la croissance démographique, soit accroître la production agricole en augmentant les rendements ou les superficies cultivables, soit réduire les pertes pré et post-récolte.

En effet, ce sont les pertes post-récolte des produits qui engendrent souvent la hausse de leurs prix, la réduction du pouvoir d'achat des consommateurs et par conséquent créent une situation d'insécurité alimentaire. Ces pertes, quantitatives et/ou qualitatives, se produisent lorsque le produit se décompose ou est infesté par des insectes, des champignons ou des microbes.

Les pertes qualitatives se manifestent en modification de la couleur, de l'odeur ou du goût, en perte de la valeur nutritive (dégradation des protéines et des vitamines) et/ou en perte de la faculté germinative des semences. Elles sont souvent causées par une contamination des denrées par des mycotoxines ou des agents pathogènes. Les mycotoxines sont produites par des champignons communément appelés moisissures, vivant généralement sur des denrées préalablement infestées par des insectes (Lamboni & Hell, 2009 ; Laurentie *et al.*, 2012). Ces mycotoxines, à l'image de l'aflatoxine produite par l'espèce *Aspergillus flavus*, sont les plus puissantes substances cancérigènes et mutagènes connues chez les consommateurs (Williams *et al.*, 2012).

Les pertes quantitatives sont souvent causées par les bioagresseurs, notamment les insectes ravageurs. Entre la récolte et la consommation, les pertes dues aux insectes sont évaluées à l'ordre de 25 à 30% (Freeman, 1980 ; Pantenius, 1988 ; López-Castillo *et al.*, 2018). De surcroît, elles constituent un obstacle majeur à la sécurité alimentaire en Afrique. Selon Wyk *et al.* (2009), le taux de perte des grains alimentaires peut varier de 50 à 100% dans les régions tropicales. Ces auteurs confortent les propos de Labeyrie (1992) qui disait «en Afrique, le paysan travaille pour les insectes». Face à cette situation, des réponses essentiellement chimiques (pesticides chimiques) ont été apportées pour combattre ces ravageurs. Cependant, compte tenu des nuisances associées à leur utilisation comme la sélection de souches résistantes de ravageurs (Bell & Wilson, 1995 ; Benhalima *et al.*, 2004 ; Schuster & Smeda, 2007 ; Sayyed *et al.*, 2008), la pollution de l'environnement et les maladies chroniques induites telles que les cancers chez les humains (OMS & PNUE, 1991 ; Aubertot *et al.*, 2005 ; Multigner, 2005 ; Isenring, 2010), d'autres méthodes moins controversées comme l'usage de plantes biocides, de nouvelles technologies de stockages, *etc*, sont apportées comme alternatives. Malgré ces nouvelles pratiques de lutte et de stockage de grains jugées performantes, les problèmes demeurent toujours en milieu paysan. Le constat est que les producteurs n'ont toujours pas la volonté de changer leurs pratiques traditionnelles, souvent méconnues des structures d'appui et d'encadrement, allant jusqu'à l'utilisation des pesticides non recommandés ou interdits.

Par conséquent, tous les leviers à la fois efficaces, simples et accessibles pouvant contribuer à la protection des produits alimentaires contre l'infestation des ravageurs nécessitent d'être activés dans une approche moderne de protection intégrée des stocks (Vincent *et al.*, 2009). Outre les critères tels que le rendement, la précocité, le stress hydrique, le poids spécifique du grain, les teneurs en protéines et en vitamines, le choix variétal serait plus judicieux en tenant compte de la fragilité des grains aux attaques des insectes ravageurs. La sélection de végétaux comestibles pour l'homme et pour les animaux, en priorité pour leur productivité, a produit des variétés qui sont particulièrement vulnérables aux bio-agresseurs, suite à une perte de leurs caractéristiques de résistance aux attaques (Philogène *et al.*, 1989 ; Gallo, 2007). L'utilisation de variétés plus tolérantes aux risques d'infestation au cours de la conservation, est un des principes et dispositions efficaces sur cette protection antiparasitaire intégrée (Pingali & Pandey, 2001 ; Gatignol & Étienne 2010), encouragés par la FAO (2012b) et la réglementation européenne visant à réduire l'usage des produits phytosanitaires (Anonyme, 2009).

Le maïs (*Zea mais* L.), considéré comme la meilleure culture qui assurerait mieux la sécurité alimentaire (Byerlee & Eicher, 1997) en Afrique est l'exemple type d'une espèce qui possède d'énormes molécules en quantité variable capables d'intervenir contre un bon nombre de menaces extérieures. Ces molécules peuvent jouer plusieurs rôles tels que la protection contre les ravageurs aussi bien chez la plante que chez les grains de maïs. La résistance variétale du maïs a fait état de plusieurs recherches scientifiques dans beaucoup de pays (López-Castillo *et al.*, 2018) et reste la meilleure alternative pour une protection efficace, simple et respectueuse de l'environnement pour les grains stockés.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la gestion intégrée des principaux ravageurs des grains stockés au Sénégal de l'équipe de recherche « Génétique et gestion des populations » (GENGESPOP) de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Il fait appel à des approches de lutttes moins controversées, basées en particulier sur l'usage de variétés plus tolérantes aux déprédations. De nos jours, la sensibilité des grains des variétés de maïs aux attaques des insectes ravageurs reste pratiquement inconnue au Sénégal. Pour apporter une contribution significative au contexte entomologique et agronomique de la protection intégrée du maïs au Sénégal, ce travail a été engagé en choisissant les deux ravageurs les plus redoutables du maïs stocké, le charançon du maïs, *Sitophilus zeamais* (Motsch.) (Coleoptera: Dryophtoridae) et le grand capucin des grains, *Prostephanus truncatus*

(Horn) (Coleoptera: Bostrichidae) (García-Lara & Bergvinson, 2007 ; Phillips & Throne, 2010 ; Hiruy & Getu, 2018 ; Muatinte *et al.*, 2019).

L'objectif général de ce travail est d'ajouter dans le choix variétal du maïs le critère de résistance aux ravageurs des denrées stockées en vue de réduire les pertes post-récolte.

Il est scindé en six objectifs spécifiques, formulés à partir d'hypothèses de recherche.

Hypothèse 1 : Les variétés de maïs ont des niveaux différents de sensibilité à l'infestation de ses deux ravageurs majeurs, *S. zeamaïs* M. et *P. truncatus* H.

- **OS1** : Evaluer la sensibilité des grains des principales variétés de maïs cultivées au Sénégal à l'infestation de *S. zeamaïs* M. et de *P. truncatus* H.

Hypothèse 2 : il existe une compétition et une dissuasion de l'oviposition interspécifiques entre *P. truncatus* H. et *S. zeamaïs* M.

- **OS2** : Caractériser les interactions interspécifiques entre *P. truncatus* H. et *S. zeamaïs* M.

Hypothèse 3 : il existe des variétés de maïs plus attractives pour l'oviposition de *P. truncatus* H. et/ou de *S. zeamaïs* M.

- **OS3** : Evaluer la préférence de ponte de *P. truncatus* H. et de *S. zeamaïs* M. en fonction des variétés de maïs.

Hypothèse 4 : il existe une différence significative en matière de caractéristiques du grain entre les variétés.

- **OS4** : Evaluer les caractéristiques morpho-physiques et la composition biochimique des grains des différentes variétés de maïs.

Hypothèse 5 : il existe des caractéristiques morpho-physiques et/ou biochimiques des grains qui sont à l'origine des niveaux de sensibilité aux attaques des insectes.

- **OS5** : Déterminer le rôle des caractéristiques morpho-physiques et biochimiques des grains sur la sensibilité variétale ;

Hypothèse 6 : il existe des indicateurs de tolérance des grains aux attaques d'insectes utilisables dans les programmes d'amélioration variétale.

- **OS6** : Identifier les facteurs clés de la sensibilité des grains aux attaques d'insectes en vue d'une utilisation dans les programmes d'amélioration variétale.

Ce travail est structuré en quatre chapitres. Le premier présente la synthèse bibliographique. Le deuxième traite la sensibilité variétale du maïs à l'infestation de *P. truncatus* H. et de *S. zeamais* M et les interactions biologiques entre les deux espèces. Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation morpho-physique et biochimique des grains de maïs. Le quatrième chapitre explore la résistance variétale du grain de maïs sur la base de sa constitution morpho-physique et biochimique.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Maïs : *Zea mays* (Linné, 1753)

Le maïs, signifie littéralement «ce qui maintient en vie» dans les langues indiennes d'Amérique. Il occupe la première place dans la production mondiale en céréales en termes de quantité et de surface, devant le blé, le riz et le mil (FAOSTAT, 2018) avec les Etats-Unis et la Chine comme principaux producteurs. Le maïs est cultivé dans des conditions très variées allant du climat tropical au climat tempéré et donc présent dans tous les continents. Il est adapté à un schéma d'agriculture vivrière comme le cas en Afrique subsaharienne, ou d'agriculture intensive comme aux Etats-Unis. L'importance de sa production s'explique d'une part par des techniques culturales modernes, mais la grande part de son augmentation est due à l'amélioration génétique et à l'introduction de nouvelles variétés à fort taux de reproduction. Les pays en développement consacrent davantage de superficies à la culture du maïs que les pays développés, dans lesquels les rendements sont beaucoup plus élevés. L'essentiel de la production du maïs des pays en développement est destinée à la consommation humaine, alors que dans les pays industrialisés, elle est surtout réservée aux aliments pour les animaux et à l'usage industriel pour la fabrication d'amidon, d'huile, de protéines, de boissons alcooliques, d'édulcorants alimentaires et, plus récemment, de carburant.

I.1.1 Origine, distribution et production

Originaire de l'Amérique (Smith *et al.*, 1985 ; Fonseca *et al.*, 2015), le maïs fut longtemps considéré par ses populations autochtones comme un «don des dieux» (Heiser, 1973). Avant de devenir une des principales céréales de l'agriculture moderne, le maïs était déjà la culture vivrière de base de toutes les grandes civilisations américaines précolombiennes (FAO, 1987), en particuliers, les amérindiens (Wilkes, 1977). La culture du maïs s'est ensuite propagée sur l'ensemble du continent américain, au Canada, puis, à partir du XVI^{ème} siècle sur tous les continents, en zone tropicale comme en zone tempérée jusqu'en Afrique au XVII^{ème} siècle. Le maïs est cultivé dans toutes les régions agricoles du monde (Mangelsdorf & Reeves, 1939) et constitue l'alimentation de base d'une importante proportion de l'humanité. Le maïs est une des rares plantes cultivées dont l'identification de l'ancêtre sauvage a fait des polémiques pendant des décennies (Mangelsdorf & Reeves, 1939 ; Wilkes, 1977 ; Kellogg, 1997).

Pour certains auteurs, l'ancêtre du maïs est la téosinte (*Zea mays*), graminée sauvage que l'on trouve encore au Mexique et au Guatemala (Wilkes, 1967 ; Doebley, 1990). D'autres pensaient, au contraire, que le maïs provient d'un maïs sauvage aujourd'hui disparu. C'est par la suite que des études génétiques ont fourni les preuves que la téosinte est le parent sauvage du maïs (Doebley *et al.*, 1995 ; Heerwaarden *et al.*, 2011). La génétique a montré également que le maïs présente d'énormes diversités morphologique et génétique qui proviennent toutes d'une seule domestication dans le sud du Mexique (Matsuoka *et al.*, 2002) à partir de la téosinte locale.

La production mondiale en maïs est essentiellement assurée par les Etats Unis avec en moyennes 51,8 %, suivis de l'Asie (30%), de l'Europe (11%) puis de l'Afrique (7,2%) de 2007 à 2016 (FAOSTAT, 2018). Aux Etats-Unis, le maïs est produit essentiellement au sud des Grands Lacs, la « Corn Belt », et en Amérique du Sud, et la grande majorité est absorbée par le marché intérieur américain. Les Etats-Unis sont aussi les premiers exportateurs de maïs dans le monde. En Asie, l'essentiel du maïs est produit par la Chine. Malgré l'importance de sa production, la Chine ne couvre pas les besoins intérieurs et le pays est donc devenu un gros importateur de maïs. En Europe, la production du maïs regroupe à la fois les pays producteurs de l'UE et de l'Europe de l'Est. Selon la FAO (FAOSTAT, 2018), les plus grands producteurs de maïs en Afrique sont l'Afrique du Sud, le Nigéria, l'Ethiopie, la Tanzanie, et l'Egypte.

I.1.2 Description morphologique et classification

I.1.2.1 Morphologie de la plante de maïs

Le maïs est une plante annuelle monocotylédone, au système racinaire fasciculé abondant. La plante se compose d'une tige résistante, dressée et creuse, sur laquelle s'insèrent de longues feuilles. C'est une espèce à pollinisation croisée où les fleurs mâles (panicules) et femelles (épis) se trouvent sur des pieds différents (plante dioïque). C'est une plante herbacée, de hauteur variable avec une tige unique de gros diamètre, constituée d'un empilement de nœuds et d'entrenœuds. Au niveau de chaque nœud sont insérés une feuille et un bourgeon axillaire. Les épis (5 à 30 cm de longueur), souvent à raison d'un par tige, sont les structures où se développent un nombre variable de rangées de grains, insérés sur des rachis ou rafles et protégés par des feuilles spécialisées, les spathes. Le poids des grains dépend de facteurs génétiques, environnementaux et agronomiques. Le grain représente environ 42 % du poids sec de la plante.

Pendant la récolte, les épis de maïs sont enlevés à la main ou mécaniquement. Les spathes recouvrant l'épi sont d'abord arrachées, puis les grains sont séparés à la main ou, le plus souvent, à la machine.

I.1.2.2 Morphologie du grain de maïs

Les grains de maïs se développent sur l'inflorescence femelle, appelée épi, par accumulation des produits de la photosynthèse, de l'absorption par les racines et du métabolisme du plant de maïs. Les grains sont le plus souvent de couleur blanche ou jaune, mais on en trouve également de noirs, de rouges et de couleurs mélangées. La teneur en composés chimiques emmagasinés par les grains explique la diversité des types de grains. Le nombre de grains par épi varie selon le nombre de rangées, le diamètre et la longueur de la rafle. Ainsi, un épi peut contenir jusqu'à 1000 grains. Le poids des grains est souvent assez variable et peut aller aux environs de 19 à 40 g pour 100 grains. Concernant la taille, elle varie entre 8 et 17 mm pour les grains de grande taille et entre 5 et 15 mm pour les grains de petite taille (Godon & Willm, 1998).

Le grain de maïs (Figure 1) renferme à la fois un tégument, un germe et un albumen, d'où son appellation caryopse chez les botanistes.

- Le tégument (ou enveloppe) est formé du péricarpe (5 % du poids du grain) qui correspond aux téguments du fruit, constitué d'une assise protéique ou couche à aleurone qui représente la première assise constitutive de l'albumen. Le tégument se caractérise par une forte teneur en fibres brutes (87 %) constituées principalement d'hémicellulose (67 %) de cellulose (23 %) et de lignine (0,1 %) (Burge & Duensing, 1989). Il est constitué également de son, riche en cellulose et en protéines.
- Le germe (11 % du poids du grain) est formé d'un embryon et d'un cotylédon (scutellum). Il constitue un organe de réserve, riche en protéines et en lipides pour la jeune plantule.
- L'albumen constitue la majeure partie, environ 75 à 85 % du poids du grain. Il est composé de l'albumen farineux situé au centre du grain, et de l'albumen vitreux (corné), plus dur, réparti en couronnes autour de l'albumen farineux. Il est constitué de cellules remplies de grains d'amidon.

Le reste du grain est composé de la coiffe, une structure conique qui, avec le pédicelle, soude le grain à l'épi de maïs. L'anatomie et la structure microscopique de différentes parties du grain de maïs ont été bien décrites par Wolf *et al.* (1952).

Le maïs corné a un grain dur, plus riche en albumen vitreux qu'en albumen farineux, d'où son surnom de silex. Il a des épis longs et cylindriques. Le maïs denté a un grain tendre, sous la forme d'une incisive et renfermant plus d'albumen farineux qu'albumen vitreux.

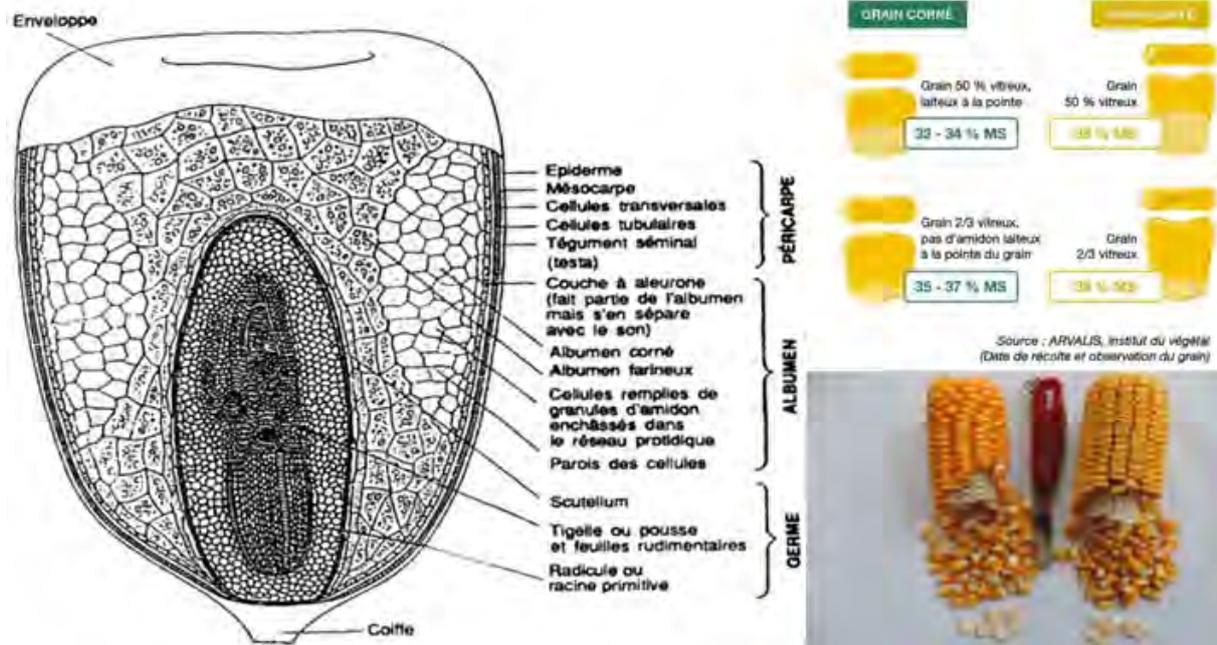


Figure 1 : Coupe longitudinale et types de grain de maïs (Corke, 2004)

I.1.3 Taxonomie et variétés

✚ Taxonomie du maïs

L'ancêtre du maïs, téosinte (*Zea mays*), est constitué de deux espèces, *Z. mexicana* et *Z. perennis* (Wilkes, 1967) toutes les deux reliées à *Zea*. Le genre *Zea* renferme des espèces annuelles et pérennes originaires du Mexique et d'Amérique centrale. Il comprend des formes sauvages, les téosintes présentes au Mexique et au Guatemala, et une forme cultivée, le maïs. En effet, on distingue quatre espèces de *Zea* dont l'une *Zea mays*.

La position systématique de cette espèce est décrite comme suit :

Règne : Plantae
Sous-règne : Tracheobionta
Division : Magnoliophyta
Classe : Liliopsida
Sous-classe : Commelinidae
Ordre : Cyperales
Famille : Poaceae
Sous-famille : Panicoideae
Tribu : Maydeae
Genre : *Zea*
Espèce : *Zea mays*

Variétés de maïs

La variété est définie comme étant une population artificielle obtenue en vue d'un usage en agriculture. Elle est reproductible, morphologiquement homogène et stable dans ses caractéristiques génétiques distinctes des autres variétés. Les milliers de variétés de maïs produites diffèrent les unes aux autres selon la taille et le nombre de feuilles de la plante, la longueur et la forme de l'épi, le rendement et la durée du cycle de maturité, la couleur (rouge, jaunet, noir, blanc,...), le type (cornée, dentée) et la constitution morpho-physique et biochimique des grains. Elles résultent des différentes mutations et sélections naturelles conduites par l'homme pour l'obtention de différents grains. Au Sénégal, plusieurs variétés de maïs sont utilisées dans la production agricole.

I.1.4 Biologie et mode de reproduction du maïs

La plante de maïs est un système métabolique dont le produit final est principalement l'amidon, contenu dans des organes spécialisés, les grains de maïs. Son développement est subdivisé en deux stades physiologiques (stade végétatif et stade reproductif).

Dans le premier stade (stade végétatif), les différents tissus se développent et se différencient jusqu'à l'apparition des structures florales. Ce stade est constitué de deux cycles. Le premier cycle est caractérisé par un développement aérien, l'apparition de feuilles, la production de matière sèche (lente) et une différenciation tissulaire des organes de la reproduction achevant ce cycle.

Tandis que le second cycle commence par une phase de développement des feuilles et des organes de la reproduction, puis se termine par une émission de stigmates. Le second stade (stade reproductif) est constitué de la fécondation des structures femelles puis la formation des épis et des grains. Ce stade commence par une augmentation de poids des feuilles et des autres parties florales puis se termine par une augmentation rapide du poids des grains (Tanaka & Yamaguchi, 1972 ; Simmons & Jones, 1985). Le maïs est une plante monoïque, c'est-à-dire que les fleurs mâles et femelles sont portées par des pieds différents de la même plante (Figure 2). La plante du maïs possède une inflorescence mâle (ou panicule) qui est constituée d'épillets en grappes spiciformes se trouvant à l'extrémité de la tige. Quant à l'inflorescence femelle (ou épi), elle est insérée à la base d'une feuille au milieu de la plante et se développe latéralement à partir d'un bourgeon axillaire. L'épi possède 12 à 20 rangées d'ovules surmontées de longs styles (les soies). L'ensemble de la structure (épi) est enveloppé dans de nombreuses bractées foliacées développées (spathes) et une masse de longs stigmates se trouve au sommet des spathes en une touffe de filaments (ou soies) (Hidalgo *et al.*, 2011). La pollinisation s'effectue par le vent qui entraîne le pollen produit par l'inflorescence mâle jusqu'aux ovules de l'inflorescence femelle. Il faut noter que chez le maïs, l'autopollinisation et la pollinisation croisée sont possibles. Et généralement, la viabilité du pollen est de 10 à 30 minutes, mais elle peut être plus longue lorsque les conditions sont favorables (Jarosz, 2004). Le cycle de maturité du maïs dure 90 à 180 jours selon la variété et les lieux de culture avec 3 phases de développement (germination, croissance et floraison). Les grains une fois formés passent 3 stades successifs : stade laiteux, stade pâteux et stade sec (Bauer & Birchler, 2006 ; Sabelli, 2012).

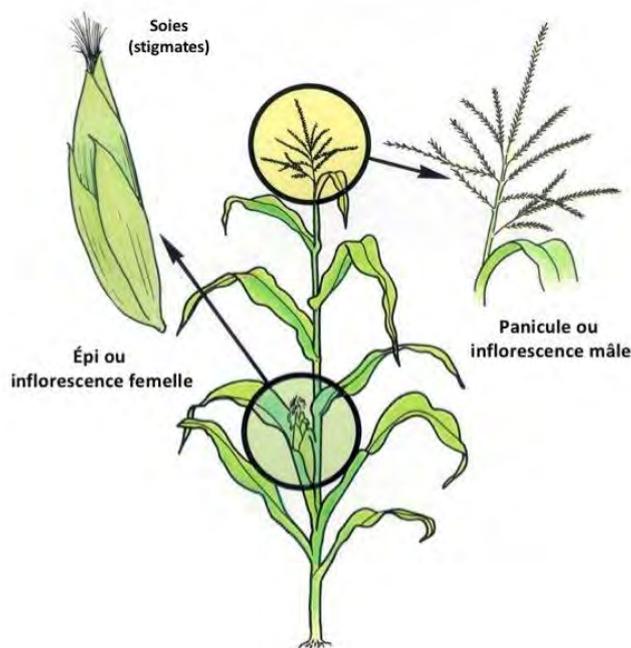


Figure 2 : Plante de maïs (source : www.gnis.fr)

I.1.5 Intérêts économiques et agronomiques

En 30 ans, la production de maïs a doublé dans le monde. Il représente la céréale la plus cultivée avec environ 41% de la production mondiale de céréales. La production en grains du maïs devance celles du riz et du blé. Sur les 91,7 millions de tonnes de maïs exportées en moyenne chaque année à travers la planète, 49% proviennent des Etats-Unis (44,9 millions de tonnes). Ensuite, ont suivi respectivement l'Argentine, avec 15 millions de tonnes exportées, le Brésil (11,9 millions de tonnes) et l'Ukraine (5 millions de tonnes). Concernant l'importation du maïs, le Japon occupe la première place (17% des importations mondiales, 15,5 millions de tonnes). Il est suivi par le Mexique et de la Corée du Sud avec 8,2 millions de tonnes chacun. Au total, l'Asie importe 35 millions de tonnes, le continent américain 18 millions et l'Afrique 11 millions (Planetoscope-Statistique, 2018). En 2012, environ 46 % de la production de maïs aux États-Unis a été utilisée pour nourrir le bétail, tandis qu'environ 27 % a servi à la production de l'éthanol. En 2014, les recettes de la culture de maïs aux États-Unis ont atteint 63 milliards de dollars, avec des exportations d'environ 50,71 millions de tonnes métriques de maïs. Ces importants chiffres leur ont permis d'occuper la première place au sujet des exportations maïsicoles au niveau mondial. Le Japon et le Mexique étaient les principaux acheteurs de leur maïs (avec environ 11,86 millions et 10,48 millions de tonnes métriques d'achat).

Durant l'année 2017/2018, les États-Unis avaient produit du maïs d'un volume supérieur à 370 millions de tonnes (Statista, 2018). Le maïs présente plusieurs intérêts agronomiques vis-à-vis de son adaptabilité à des conditions très variées allant du climat tropical au climat tempéré, de sa capacité à se développer dans toutes les régions agricoles du globe, de sa diversité variétale, de son adaptation en associations avec d'autres cultures, *etc.* Son adaptation à tous les reliefs fait qu'on récolte du maïs en dessous du niveau de la mer dans la plaine Caspienne, et à plus de 4 000 m d'altitude (Bassaler, 2000) dans les Andes péruviennes. Face aux augmentations simultanées de la demande alimentaire et de la pression démographique, le maïs présente un atout offrant une possibilité de diminuer la jachère. En effet, les associations de culture maïs/légumineuses produisent plus de biomasses que la monoculture de maïs sans pour autant augmenter les temps de travaux (Emuh, 2007; Coulibaly *et al.*, 2012), tout en maintenant la fertilité des sols. Le maïs est également doté d'un potentiel agronomique exceptionnel. Par exemple l'épi peut mesurer jusqu'à 30 cm, le nombre de feuilles sur la tige peut varier de quelques-unes à 50, la forme (cornée, dentée, pop, cornée-dentée), la couleur (blanc, jaune, roux, bleu), le poids et la structure des grains (vitreux, cireux ou waxy...) sont aussi très variables. Le maïs a une large gamme de cultivars et d'hybrides avec des périodes de maturité différentes. Les hybrides localement adaptés, quand ils sont disponibles, sont de loin plus productifs que les cultivars sélectionnés (Malvar *et al.*, 2008). Pour les régions à courtes saisons de pluies, des variétés de maïs tolérantes ont été développées pour survivre à la sécheresse (Welcker & Rami, 2008).

1.1.6 Valeur nutritionnelle et utilisation du maïs

A l'origine, le maïs était une culture vivrière destinée à l'alimentation humaine. Il garde toujours ce statut dans plusieurs pays, notamment en Afrique, en Amérique, en Inde et en Asie. En Afrique de l'Ouest, le maïs occupe une place importante dans le régime alimentaire des populations (Adjile, 2012). Par contre, dans les pays développés, le maïs est surtout destiné à l'industrie (amidon) et à l'alimentation animale, soit sous forme de grain ou d'ensilage de la plante entière. Il fournit des éléments nutritifs aux humains et aux animaux (Burge & Duensing, 1989 ; Charcosset & Gallais, 2009) et sert de matière première à l'industrie. Toutes les parties de la plante de maïs sont utilisées. Les tiges servaient de couverture, d'isolation et de comblement d'ornières.

Les tiges rigides de certaines variétés continuent d'être utilisées en milieu rural dans les pays en développement pour la fabrication de clôtures et de parois très résistantes.

Quant aux feuilles, elles servaient à la confection des paillasses, à l'emballage du beurre, à la confection de poupées et à l'alimentation des vaches laitières. Les rafles servaient à faire du feu, à cuire les gaufres, de brosse à habits ou à chaussures, de lustrer les meubles, de bouchon de bouteille, *etc.* Les rafles sont constituées essentiellement de cellulose et contribuent au maintien de la teneur en humus des sols (Malvar *et al.*, 2008) lorsqu'elles sont enfouies avec les pailles dans le sol. Les stigmates «la barbe» entraînent dans la confection de tisanes (un puissant diurétique) ou de cigarettes. Les grains de maïs nourrissaient les poules, les pigeons et les porcs, tandis que la farine était utilisée pour l'engraissement des porcs et des bovins. La plante entière était broyée et ensilée (fourrage) pour nourrir les bovins. Les grains humides sur l'épi font encore l'objet d'une très grande consommation par l'homme, sous forme bouillie ou grillée.

De nos jours, le maïs subit une multitude de transformations industrielles pour donner une gamme très variée d'aliments (Parmentier & Foua, 1989). Les utilisations industrielles du maïs sont très diversifiées. Il est utilisé dans l'industrie pour la fabrication de protéines, d'amidon, de boissons alcooliques, d'édulcorants alimentaires, d'huiles..., et plus récemment, pour la production de carburant. Son importance industrielle a également créé des débouchés dans l'agroalimentaire, la papeterie-cartonnerie, la pharmacie, les cosmétiques, les industries textiles et la métallurgie. Dans l'agroalimentaire, plusieurs produits tels que les soupes, les potages, les sauces, les charcuteries, les crèmes glacées, les pâtisseries, les confiseries, les chocolats, les produits diététiques, *etc.* sont faits à base de maïs (Milán-Carrillo *et al.*, 2004 ; Rosentrater, 2006). La pharmacie et les cosmétiques génèrent d'énormes produits à base de maïs comme les antibiotiques, les crèmes de beauté, les dentifrices,... Dans l'industrie, le maïs est utilisé pour fabriquer des peintures, des encres, des produits d'entretien, des plastiques, des gélifiants, des stabilisants, des liants et des produits de rétention d'eau (Singh *et al.*, 2003), des colorants, *etc.* Les amidons sont utilisés également comme composites des polymères employés en emballages biodégradables (Gross & Kalra, 2002). La semoulerie de maïs (ou maïserie) a pour principal débouché la brasserie (80 %), la fabrication de corn flakes et de biscuits apéritifs. La distillerie du maïs a donné naissance au gin et au whisky (Pflugfelder *et al.*, 1988) mais aussi aux biocarburants notamment de l'éthanol (Walker, 2011).

En plus du caractère renouvelable du maïs par rapport au pétrole, le bioéthanol produit à partir de la culture de maïs permettrait de réduire les quantités de gaz à effet de serre rejetés dans l'atmosphère (Eaves & Eaves, 2007).

I.1.7 Composition chimique des grains de maïs

Le grain de maïs est caractérisé, d'une part, par une grande hétérogénéité et complexité de son aspect morphologique et de sa structure physique, et d'autre part, par d'importantes variations de sa composition chimique. Le grain de maïs est constitué environ 71,50 % d'amidon, plus de 10 % de protéines, 4-6 % de matières grasses dont 4,80 % de lipide (Earle *et al.*, 1946), de fibres brutes (2-2,5 %) (Semassa *et al.*, 2016), de minéraux (calcium, phosphore) et des vitamines telle que la Thiamine ou vitamine B1 (Gutiérrez-uribe *et al.*, 2010 ; Hidalgo *et al.*, 2011). Les caractéristiques indiquées par la FAO pour le maïs destiné à l'alimentation humaine sont les suivantes (Yapi & De, 2017) :

- glucides : 72 à 73 % de sucre lent (amidon) plus 1 à 3 % de sucre rapide (glucose, saccharose et fructose) soit 18,8 g de glucides pour 100 g de maïs ;
- protéines : 8 à 11 % soit 2,9 g de protéines pour 100 g de maïs ;
- lipides : 3 à 18 % (dont 13 % d'acides gras saturés) soit 1,3 g de lipides pour 100 g de maïs ;
- fibres alimentaires ;
- minéraux (teneur en mg pour 100 g) : P (299,6±57,8), K (324,8±33,9), Ca (48,3±12,3), Mg (107,9±9,4), Na (59,2±4,1), Fe (4,8±1,9), Cu (1,3±0,2), Mn (1,0±0,2), Zn (4,6±1,2) ;
- vitamines A et E ;
- valeur nutritionnelle : 99 kcal (ou 414 kJ) pour 100 g ;
- indice glycémique : 65.

Amidon des grains de maïs

L'amidon, synthétisé par la plante à partir de la photosynthèse (énergie solaire), est après la cellulose, la substance de réserve la plus répandue chez les végétaux supérieurs. Il est présent dans un grand nombre de matières premières agricoles comme les céréales (30 à 70%), les tubercules (60 à 90%), les légumineuses (25 à 50%) et dans certains fruits.

Il a une valeur énergétique de 4,13 kcal/g (Paul & Southgate, 1978), ce qui donne 17 kJ/g avec le facteur de conversion 1 kcal = 4,184kJ arrondis à deux chiffres (Royal Society, 1972 ; in FAO et OMS, 2005). L'amidon est un polysaccharide naturel semi cristallin qui suscite un intérêt croissant dans des applications alimentaires et non alimentaires. Il est composé de deux polymères de structure primaire différente : l'amylose, molécule essentiellement linéaire et l'amylopectine, molécule ramifiée (Schoch, 1945 ; Hu *et al.*, 2010 ; Kim *et al.*, 2012). Il est constitué de granules dont la taille, la composition et les propriétés physico-chimiques et fonctionnelles dépendent des variétés (Li *et al.*, 1994 ; Seetharaman *et al.*, 2001 ; Sandhu *et al.*, 2005), des conditions de culture (Paterson *et al.*, 2001 ; Hardacre & Clark, 2006) et du rapport amylose/amylopectine. La quantité d'amylose dans l'amidon des grains de maïs est estimée par Seetharaman *et al.* (2001) entre 16,1 et 23,3 % et par Sandhu *et al.* (2004) entre 15,3 et 25,1%. Les amidons de certaines variétés de maïs sont essentiellement composés d'amylopectine, tandis que d'autres sont beaucoup plus riches en amylose (Zobel, 1984). Une forte proportion d'amylose dans l'amidon est associée à une amélioration de la santé cardio-vasculaire chez les consommateurs du maïs (Rahman *et al.*, 2007) et à une résistance des grains aux insectes granivores (Peters *et al.*, 1972 ; Dobie, 1974 ; Mendiola-Olaya *et al.*, 2000).

Protéines

Les protéines constituent le deuxième constituant pondéral du grain de maïs avec environ 10% de son poids. Par ailleurs, beaucoup de travaux scientifiques ont été consacrés sur les protéines du maïs (Bressani & Mertz, 1958 ; Wolf *et al.*, 1969). La qualité nutritionnelle du maïs est déterminée par la quantité et la constitution de ses protéines (Zilic *et al.*, 2011). Elles ont une valeur énergétique de 4kcal/g (Paul & Southgate, 1978), correspondant à 17 kJ/g. Les protéines des grains de maïs sont constituées de trois familles majeures appelées protéines de réserves. Nous avons la famille des albumines, la famille des globulines essentiellement présentes dans l'embryon et la famille des prolamines, communément appelées fraction zéine et sont stockées dans l'albumen (Landry & Moureaux, 1970 ; Kriz, 1989 ; Shewry & Casey, 1999). Outre les protéines du germe relativement riches en albumines et en globulines, les protéines du maïs sont d'une petite valeur nutritionnelle. La zéine (prolamine) qui en constitue la fraction majeure est dépourvue de lysine et de tryptophane, deux acides aminés essentiels (Wilson, 1983 ; Lawton, 2002 ; Anderson & Lamsal, 2011).

Certains auteurs affirment que les protéines, en particulier la famille des zéines, jouent un rôle protecteur des grains de maïs contre les insectes (Dombrink-Kurtzman & Bietz, 1993 ; Eyherabide *et al.*, 1996 ; Robutti *et al.*, 1997). Par contre, d'autres soutiennent qu'elles constituent une ressource nutritive majeure qui favorise le développement des insectes granivores sur les grains (Yadu *et al.*, 2000 ; Fourar-Belaifa & Fleurat-Lessard, 2015).

Matières grasses

Les matières grasses représentent environ 5% du poids du grain de maïs et proviennent essentiellement du germe (Semassa *et al.*, 2016). Sa teneur varie en fonction du type de variété (Semassa *et al.*, 2017). La matière grasse a une valeur énergétique de 9 kcal/g (Paul & Southgate, 1978) correspondant à 37 kJ/g. L'huile de maïs contient des quantités d'acides gras relativement importantes et constitue une excellente source d'acide linoléique (Weber, 1987 ; Bressani *et al.*, 1990). Cette huile est principalement utilisée pour la cuisine et pour la production de produits comme la margarine (Carrillo *et al.*, 2017). Les acides gras constituent plus de 90 % des matières grasses du maïs et sont composés de l'acide linoléique (C18:2), l'acide oléique (C18:1), l'acide palmitique (C16:0), l'acide stéarique (C18:0), l'acide linoléique (C18:3), l'acide myristique (C14:0) et l'acide arachidonique (C20:4) (Morand-Fehr & Tran, 2001).

Composés phénoliques

Les composés phénoliques sont classés en familles (Collin & Crouzet, 2011) selon le nombre de cycles phénoliques et des éléments structurels qui les lient les uns aux autres. Ainsi, nous avons les acides phénoliques, les flavonoïdes, les stilbènes et les lignanes. Manach *et al.* (2004) les séparent en deux classes que sont les dérivés de l'acide benzoïque (acides hydroxybenzoïques) et les dérivés de l'acide cinnamique (acides hydroxycinnamiques ou phénylpropanoïdes). Les acides hydroxycinnamiques sont couramment trouvés dans les parois cellulaires de la matière végétale, en particulier, les acides p-coumarique, caféique et férulique. Les acides phénoliques (ou polyphénols) sont des composés organiques qui possèdent un hydroxyle phénolique et au moins une fonction carboxylique. Les acides phénoliques, en particulier l'acide férulique et l'acide p-coumarique, sont présents majoritairement dans les grains de maïs (Zhang *et al.*, 2017).

Ils jouent un rôle primordial dans la résistance des plantes contre les infections (Abass *et al.*, 2014) et des grains contre les déprédateurs (Serratos *et al.*, 1987 ; Classen *et al.*, 1990 ; Arnason *et al.*, 1992 ; Philogène & Arnason, 1995 ; Santiago & Malvar, 2010 ; Bauer *et al.*, 2012 ; García-Lara & Bergvinson, 2014). Ils ont des propriétés anti-oxydantes (Adom *et al.*, 2003 ; Gonçalves *et al.*, 2005 ; Kean *et al.*, 2008 ; Boz, 2015) et leur abondance dans les aliments joue un rôle important dans la prévention des cancers et des maladies cardiovasculaires et neurodégénératives (Mori *et al.*, 1998 ; Andreasen *et al.*, 2001 ; Manach *et al.*, 2004 ; Liu, 2007 ; Boz, 2015).

1.1.8 Maïs au Sénégal

Le maïs, une céréale cultivée traditionnellement au Sénégal, occupait la première place dans la production céréalière en 2004 devant mil et le riz, puis la deuxième position de 2005 à 2006 derrière le mil, et ensuite la troisième place (FAOSTAT, 2018). Généralement cultivé sous pluies (ANSD, 2014), la production nationale du maïs est assurée par quelques régions (Fatick, Kaffrine, Kaolack, Kédougou, Kolda, Sédhiou et Tambacounda) qui ont des potentialités agro-climatiques favorables à sa culture. Cette céréale est également cultivée dans la Vallée du Fleuve Sénégal, essentiellement dans des périodes de décrue. Les rendements du maïs restent aléatoires au Sénégal (FAOSTAT, 2017), malgré les potentialités agronomiques des variétés sélectionnées et les efforts consentis par la recherche et les structures d'encadrement. Sa culture dépend fortement de la pluviométrie, et les quantités produites ne suffisent pas pour couvrir la demande au niveau national. Ainsi, l'enveloppe sénégalaise dépasse 12 milliards de francs CFA, chaque année, pour importer du maïs (USAID/PCE, 2012). Cependant, ce maïs importé arrive au Sénégal avec teneurs en aflatoxines totales qui varient de 1,8 ppb à 6,5 ppb (Diagne, 2019), dépassant largement les normes fixées par la réglementation européenne en vigueur. Il est beaucoup consommé dans la Vallée du fleuve Sénégal, le Sud et l'Est du pays (Guèye *et al.*, 2008). C'est une céréale utilisée de diverses façons comme nourriture par une bonne partie de la population et couvre les périodes de soudure dans certaines zones du pays.

Au Sénégal, il existe trois types de transformations du maïs que sont la transformation artisanale, la transformation semi-industrielle et la transformation industrielle. La transformation artisanale des grains de maïs en farine, souvent pratiquée par la population rurale, se fait à l'aide de mortiers et de pilons.

Ce type de transformation est dû au déficit de moulins dans ces zones rurales. La transformation semi-industrielle, effectuée par des Groupements d'Intérêt Economique (GIE de Transformation de Céréales), de Fédérations et de Sociétés (sociétés la VIVRIERE, AGRIDEV, UTRAPAL de Saint Louis, *etc.*), génère des produits secondaires de forte valeur ajoutée (Arraw, Thiakry, Couss-couss,...) à partir des grains de maïs. Quant à la transformation industrielle, elle est assurée par de grandes industries tels que les Moulins SENTENAC, les Grands Moulins de Dakar (GMD), la Nouvelle Minoterie Africaine (NMA), l'Institut de Technologie Alimentaire (ITA),... qui valorisent les céréales comme le maïs. Elles mettent sur le marché des produits alimentaires à haute valeur nutritionnelle et énergétique tels que les pains, pains au lait, couss-couss, petits fours, gâteau marbré, gâteau à la noix de coco, crêpes sucrées, beignets au poisson, diouka, pizzas, crêpes fourrées, sanxal royal avec sauce de viande et maïs au poisson,... Le maïs, consommé même en produits brutes (grains humides sur l'épi), représente une importante source d'énergie, de protéines, de vitamines, *etc*, pour le régime alimentaire des sénégalais.

I.1.9 Importance du stockage de maïs au Sénégal

A l'instar de la plupart des pays d'Afrique Subsaharienne, la conservation des récoltes permet d'assurer la disponibilité des ressources alimentaires et est considérée comme l'un des facteurs-clés de la sécurité alimentaire au Sénégal. Ceci est d'autant plus justifié que, la production est généralement saisonnière alors que les besoins des consommateurs s'étendent sur tout le long de l'année (Ngamo & Hance, 2007). Le stockage du maïs est un impératif que les familles rurales respectent pour s'épargner des pénuries alimentaires et par conséquent, des famines pendant la période de soudure. Ces stocks servent aussi, pour la majeure partie de ces familles, à des semences pour la saison suivante et à répondre aux besoins financiers en vendant une portion.

Le maïs est soumis à des déprédations constantes par des ravageurs depuis la parcelle jusqu'au stockage.

I.2 Principaux ravageurs du maïs

Les ravageurs du maïs sont constitués généralement de microorganismes (en particulier les moisissures), de rongeurs et surtout d'arthropodes. Les arthropodes ravageurs les plus redoutables du maïs sont les insectes.

Les insectes constituent environ les 4/5 des espèces animales (Lecointre & Le Guyader, 2006), et ont une organisation particulière qui les différencie facilement des autres formes animales.

I.2.1 Organisation des insectes

Les insectes, bien qu'étant des organismes de petite taille, ont des organisations externe et interne spécifiques qui les discriminent des autres espèces animales et les confèrent également d'énormes capacités de fonctionnement et de survie.

I.2.1.1 Organisation externe des insectes

Le corps d'un insecte est subdivisé en trois grandes parties distinctes que sont la tête, le thorax et l'abdomen.

La tête : elle porte les pièces buccales, les yeux composés ou simples (ocelles ou facettes) et une paire d'antenne (multiarticulées servant au toucher et à l'odorat). Les yeux et les antennes des insectes sont constitués de systèmes visuels et sensoriels très poussés les permettant de localiser et évaluer les aliments, les abris, les partenaires et les substrats de reproduction, ainsi que pour éviter les prédateurs et autres dangers, ou tout simplement pour se déplacer (Hansson & Stensmyr, 2011). Les antennes se présentent sous une multitude de formes (filiformes, flabellées, lamellées, en massue,...) mais respectent néanmoins les mêmes principes de base (Schneider, 1964). Les pièces buccales servent à mastiquer, à piquer, à sucer ou à laper. Elles sont constituées d'un labre (lèvre supérieure), d'une paire de mandibules, de langue, d'une paire de mâchoires ou maxilles (lacinia, galéa et palpes), et d'un labium ou lèvre inférieure (Glosses et paraglosses). Ces différentes pièces ont des formes variables, adaptées au mode de prise de nourriture des insectes : broyage, pique, léchage, *etc.* Outre les antennes, les insectes détectent également les odeurs avec leurs palpes maxillaires et / ou leurs lèvres (Hansson & Stensmyr, 2011).

Le thorax : il est constitué de trois métamères ou segments (pro, méso et métathorax) portant trois paires de pattes articulées, une ou deux paires d'ailes chez les insectes supérieurs, dont l'une constituée d'ailes antérieures dures et cornées appelées élytres (sert de protection aux ailes de vol et d'équilibre à l'insecte au moment du vol) et une autre paire composée d'ailes membraneuses (ailes du vol).

Chaque patte est constituée de cinq articles principaux reliés par des membranes articulaires que sont la hanche ou coxa (qui relie la patte à l'animal), le trochanter, la cuisse ou fémur, la jambe ou tibia, et le tarse (pied) composé de trois à quatre tarsomères (Lehane, 2005).

L'abdomen : il est composé de onze métamères primitivement (9 à 10 métamères le plus souvent) et contient la plupart des éléments de l'appareil digestif et des organes d'excrétion (élimination des excréments) et ceux de la reproduction. Au bout de l'abdomen se trouve une petite pointe pour les mâles et un réceptacle d'œufs pour les femelles (Bodenheimer, 1928; Buckland, 1981 ; Klass & Ulbricht, 2009). Ces pointes ou réceptacles ne sont pas évidents chez les Coléoptères, mais sont relativement manifestes chez les Lépidoptères. Des orifices respiratoires (stigmates) apparaissent par paire le long du thorax et de l'abdomen permettant l'entrée de l'air dans les trachées.

I.2.1.2 Organisation interne des insectes

L'organisation interne des insectes comporte le tube digestif qui est formé de la cavité buccale, avec les glandes salivaires, de l'intestin antérieur, de l'estomac et de l'intestin postérieur. L'appareil circulatoire est formé d'un cœur allongé pourvu d'ostioles sur les côtés (orifice généralement fermé par une valvule) et d'une aorte antérieure ; il n'y a ni veines ni capillaires (Berbari *et al.*, 2009 ; Fortunato & Turillazzi, 2012). Les lacunes entre les viscères forment l'hémocèle (cavité dans laquelle circule le sang). L'appareil respiratoire se compose de trachées (tubes) tapissées de chitine ; l'oxygène y est transporté depuis les stigmates, orifices qui s'ouvrent sur les deux côtés du thorax et de l'abdomen, directement jusqu'aux tissus (Ashmore, 2008 ; Chih *et al.*, 2011). Le système nerveux se compose des ganglions sus-œsophagien et sous-œsophagiens reliées à une double chaîne nerveuse ventrale ; chaque segment comporte un ou deux ganglions. Il enregistre des informations utilisées par la suite pour générer une représentation interne simplifiée du monde extérieur complexe, ce qui permet à l'insecte de décider et d'exécuter la réponse comportementale appropriée en fonction de la situation (Hansson & Stensmyr 2011). Les organes de sens sont les yeux, les chémorécepteurs pour l'olfaction sur les antennes et pour le goût autour de la bouche ainsi que différents poils tactiles (Kaupp, 2010 ; Hansson & Stensmyr, 2011). Le système reproducteur est formé des gonades, tubules multiples comportant un canal médian dans la partie postérieure. La fertilisation est interne.

Les œufs sont riches en vitellus et recouverts d'une enveloppe protectrice (Lehane, 2005 ; Klass, 2008). Le développement comporte le processus appelé métamorphose qui comprend une série de changements que subit l'insecte avant d'arriver à la forme adulte à partir de l'œuf (Dugon & Arthur, 2012).

La métamorphose complète comprend plusieurs stades larvaires, un stade nymphal et l'adulte. La métamorphose est incomplète lorsque le développement comporte plusieurs stades nymphaux semblables à la forme adulte. Certains insectes se reproduisent par parthénogénèse (reproduction asexuée) (Heuer *et al.*, 2012).

On peut catégoriser les insectes ravageurs selon leur classification biologique ou selon les substrats auxquels ils s'attaquent. Sur la base du substrat alimentaire (nature et stades végétatifs de l'hôte), les insectes constituent un groupe remarquablement diversifié. On peut distinguer trois catégories d'insectes ravageurs du maïs :

- ✓ ceux qui attaquent les plantes au champ ;
- ✓ ceux qui infestent les récoltes dès le champ et qui continuent en stockage ;
- ✓ ceux qui sont exclusivement inféodés aux stocks.

I.2.2 Insectes ravageurs de la culture du maïs

Plusieurs ordres d'insectes attaquent le maïs au champ comme les Coléoptères, les Diptères, les Lépidoptères... Cependant, l'ordre le plus redoutable sur la culture de maïs est celui des lépidoptères, dont les adultes sont appelés papillons et les larves sont appelées chenilles. Ce sont ces chenilles qui causent les principaux dommages au champ. Selon Hoopen et Maïga (2012) et Paliwal et FAO (2002), ces insectes ravageurs sont constitués essentiellement par :

- ❖ le ver gris noir, *Agrotis ipsilon* H., qui coupe les plants de maïs au ras du sol ;
- ❖ le ver de l'épi du maïs, *Helicoverpa zea* B., qui cause des dommages souvent concentrés autour de la pointe de l'épi ;
- ❖ la chrysomèle des racines, *Diabrotica virgifera* L., dont la larve sectionne les racines, incurve les tiges en col-de-cygne et renverse des plants depuis leur base ;
- ❖ l'altise du maïs, *Chaetocnema pulicaria* M., qui cause la maladie de Stewart, la brûlure bactérienne des feuilles ;
- ❖ le puceron du maïs, *Rhopalosiphum maidis* F., le perceur-suceur qui se nourrit des sucs du maïs ;

- ❖ les cicadelles du rabougrissement du maïs, *Dalbulus maidis* De Long et Wolcott. ;
- ❖ les foreurs de tige de maïs dont, *Busseola fusca* F., *Sesamia calamistis* H.,... Ces foreurs causent d'énormes dégâts chez le maïs et à tous les stades de développement de la plante. Ils sont nombreux et varient en fonction des pays.
- ❖ la larve de la pyrale du maïs, *Ostrinia nubilalis* qui cause de diverses pourritures de la tige ;
- ❖ les thrips ;
- ❖ *etc.*

Après la récolte, le maïs est conservé au Sénégal sous trois formes que sont maïs despathé, maïs non despathé et maïs égrené. Durant cette conservation, il est attaqué par des ravageurs qui causent d'énormes pertes quantitatives et qualitatives.

I.2.3 Insectes ravageurs du maïs stocké

Les stocks de maïs subissent d'énormes attaques qui non seulement en détruisent un fort pourcentage, mais rendent également les grains ou la farine de maïs impropres à la consommation. Les insectes des stocks de maïs, constitués majoritairement de Coléoptères et de Lépidoptères, consomment les grains ou les produits de transformation, notamment au cours de leur développement larvaire, qui se passe souvent à l'intérieur du grain. Ils sont constitués de deux catégories : ceux qui attaquent les récoltes dès le champ et qui continuent dans les stocks, en particulier le grand capucin des grains, *Prostephanus truncatus* H., et ceux qui sont exclusivement inféodés aux stocks, tels que les charançons du maïs, *Sitophilus zeamais* M., *Sitophilus oryzae* L., les dermestes des grains, *Trogoderma granarium* E., le tribolium rouge de la farine, *Tribolium castanum* H., le tribolium brun de la farine, *Tribolium confusum* D., le cucujide roux, *Cryptolestes ferrugineous* S., les petits capicins des grains, *Rhyzopertha dominica* F., les alucites des céréales, *Sitotroga cerealella* O., la teigne des fruits secs, *Plodia interpunctella* H., la teigne des grains, *Nemapogon granella*, *etc* (Paliwal & FAO, 2002 ; Guèye *et al.*, 2011). Ces insectes consomment souvent le germe du grain, affectant ainsi le pouvoir germinatif (Dabiré *et al.*, 2008). Dans certains cas, le germe n'est pas attaqué mais la consommation de l'endosperme réduit le poids et la qualité du grain. Ainsi, la germination peut donc avoir lieu mais elle produit un jeune plant faible et vulnérable aux attaques des moisissures, de bactéries et d'autres insectes.

Les insectes contaminent les céréales en général et le maïs en particulier par les restes ou vestiges de leur développement larvaire (exuvies, déchets, œufs ...), par leurs déjections, par les sécrétions malodorantes et parfois toxiques des adultes et des larves (qui déprécient fortement la denrée). L'infestation des grains de maïs par les insectes favorise aussi l'attaque d'autres espèces tels que les insectes ravageurs secondaires et les microorganismes (champignons) (Lamboni & Hell, 2009). Un nombre élevé de toiles tissées par les lépidoptères pourra dans certains cas rendre une farine de maïs totalement impropre à la consommation.

Les insectes ravageurs des denrées stockées sont constitués majoritairement de Coléoptères qui peuvent causer la perte totale d'un stock selon la région.

1.2.4 Coléoptères

Les Coléoptères sont les plus redoutables ravageurs des denrées stockées dans les pays tropicaux. Parmi le nombre important des Coléoptères qui attaquent les denrées entreposées, environ 25 espèces seulement sont considérées comme des ravageurs d'importance (Delobel & Tran, 1993). Ces 25 espèces sont réparties dans neuf familles que sont les Ténébrionidés, les Curculionidés, les Cucujidés, les Bruchidés, les Dermestidés, les Bostrichidés, les Nitidulités, les Ptinidés et les Lathridiidés (Beavis, 1988). Les adultes des coléoptères ont une taille comprise entre 0,25 mm et 15 cm, avec un dimorphisme sexuel souvent marqué et un corps fortement sclérifié. Les mâles se distinguent des femelles par la forme, les antennes, les articles des tarsi (pattes antérieures), la taille, la couleur et la configuration générale du corps (Wasielowski *et al.*, 2009 ; Klass *et al.*, 2012). Le cycle de développement des Coléoptères ravageurs des denrées entreposées varie de quelques semaines (3 à 12) et est constituée de quatre stades distinctifs : œuf, larve, nymphe (pupe) et adulte (Cruz *et al.*, 1988 ; Delobel & Tran, 1993). Le stade larvaire étant plus long chez certaines espèces (Zhao *et al.*, 2008), il est généralement le seul stade auquel l'insecte se nourrit des denrées alimentaires, et est par conséquent responsable des dégâts. La nymphose se déroule dans le sol ou dans le milieu nutritif de la larve pour la plupart. En plus de leurs dégâts économiques, l'infestation des denrées entreposées par les Coléoptères engendre d'autres types d'actions nuisibles. En effet, lorsqu'ils sont assez nombreux, la respiration des coléoptères augmente l'humidité et la température du milieu.

Ceci entraîne un réchauffement qui affecte la qualité et le pouvoir germinatif des grains, les champignons et les bactéries se multiplient, le grain est grillé et sa teneur en acides gras libres augmente (Cruz *et al.*, 1988). L'importance des dommages varie selon l'espèce, le taux d'accroissement de la population, la voracité des larves, la température, l'humidité et la valeur nutritive de la denrée entreposée (Delobel & Tran, 1993 ; Herrera *et al.*, 2010). Les Coléoptères se trouvent un peu partout, sauf dans la mer à l'exception de quelques espèces (*Cillenus lateralis* Sam., *Aepus marinas* Strom. et *Aépus Robini* Lab.) qui vivent exclusivement sur les sables maritimes et se laissent submerger à marée haute (Bajerlein & Bloszyk, 2004). Selon ces auteurs, ces espèces ont la faculté de fermer à volonté leurs stigmates pour résister longtemps à l'asphyxie. Parmi les Coléoptères, les deux espèces les plus reconnues pour leurs aptitudes remarquables à endommager le maïs séché sont le charançon du maïs, *Sitophilus zeamais* M. et le grand capucin du maïs, *Prostephanus truncatus* H., qui attaquent les épis depuis le champ et prolifèrent dans le maïs stocké (Dick, 1988 ; Philogène *et al.*, 1989 ; Markham *et al.*, 1994 ; Phillips & Throne, 2010 ; Hiruy & Getu, 2018 ; Muatinte *et al.*, 2019).

I.2.4.1 *Sitophilus zeamais* (Motschulsky)

Sitophilus zeamais, appelée communément charançon du maïs, est l'insecte le plus fréquemment rencontré dans le maïs stocké en milieu tropical (Combs & Porter, 1986). Selon Steffan (1978) et Appert (1992), il peut être présent sur les grains dès la maturité au champ et leur facilité de vol favorise leur dissémination. Le développement larvaire et la nymphose s'effectuent à l'intérieur du grain, puis l'adulte émerge.

I.2.4.1.1 Origine et distribution

Le charançon du maïs est une espèce cosmopolite qui s'adapte bien aux températures et humidités élevées. Cet insecte est le plus redoutable ravageur du riz dans le monde et selon Delobel et Tran (1993), il est particulièrement répandu en Afrique sur le maïs. *Sitophilus zeamais* est largement répandu dans les régions tropicales et subtropicales et est transporté vers les régions tempérées par les matières premières d'importation. Sa propagation est aggravée par l'importation régulière des produits céréaliers et du matériel de stockage de ces produits. La réutilisation des sacs constitue également une importante source d'infestation. En effet, les insectes se réfugient dans les lignes de coutures et les mailles.

I.2.4.1.2 Description morphologique et taxonomie

L'adulte de *S. zeamaïs* (Figure 3) mesure entre 2,3 à 4,5 mm de long. De couleur brun-rouge foncé à noire, il se distingue par quatre taches rougeâtres sur les élytres (deux taches claires sur chaque élytre). Il possède une paire d'ailes antérieures dures et tannées (élytres) et une autre paire postérieure qui est membraneuse (ailes de vol). L'insecte a un corps cylindrique et s'identifie facilement par son rostre allongé qui porte la paire d'antennes coudées en forme de massue. La femelle se distingue du mâle par son rostre plus long, plus lisse et plus effilé (Halstead, 1963). Il a une armature buccale de type broyeur que la femelle utilise pour perforer les grains et dépose les œufs à l'intérieur. Cette espèce a un thorax bien développé, une métamorphose complète et quatre stades de développement distincts (œuf, larve, nymphe et d'adulte). *Sitophilus zeamaïs* ressemble beaucoup à *S. oryzae* mais il se distingue néanmoins de ce dernier par sa taille plus grande, sa coloration plus sombre et ses quatre taches plus claires et plus distinctes (Goergen, 2005). La larve de *S. zeamaïs* est apode, dure, de couleur blanche, de forme légèrement courbée, et elle vit uniquement dans le grain.

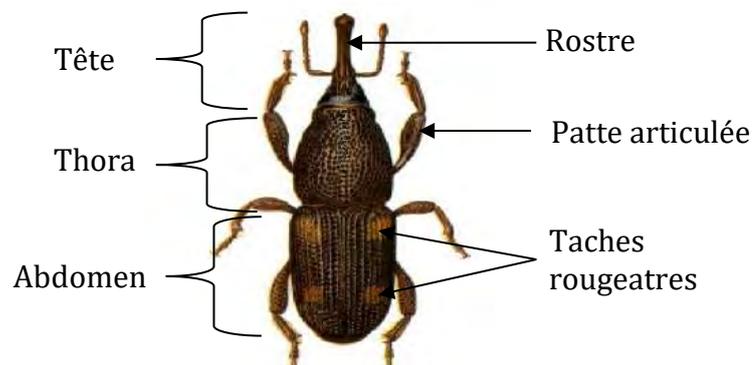
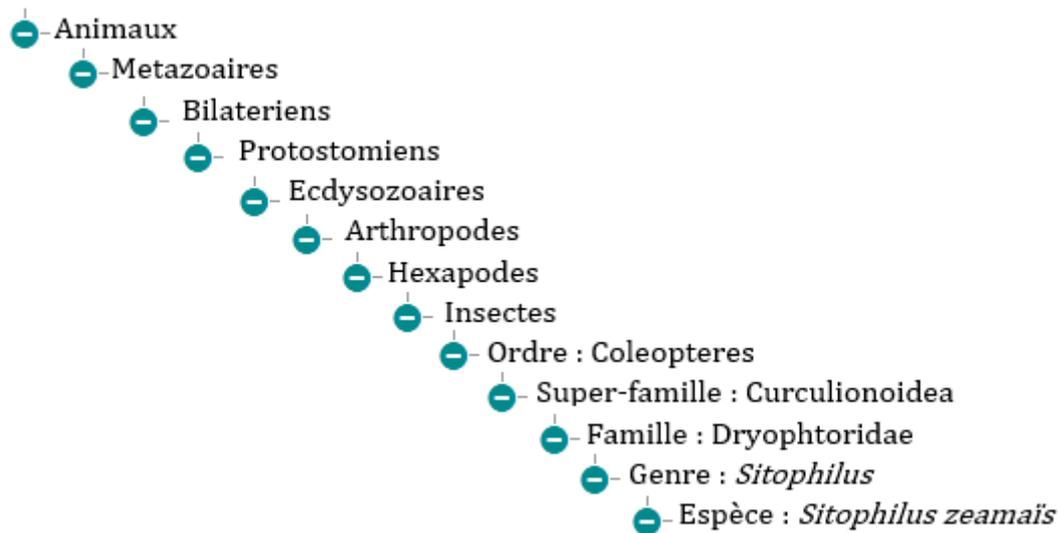


Figure 3 : Adulte de *Sitophilus zeamaïs* M. (Gorgen, 2005)

Taxonomie phylogénétique de *S. zeamais* (Myers *et al.*, 2019) est la suivante :



I.2.4.1.3 Bio-écologie

Le charançon du maïs vit dans les zones chaudes et humides et est particulièrement fréquent dans les zones où le maïs est cultivé. Au champ, le maïs devient surtout attractif lorsque les spathes sont écartées (la couche d'aleurone et / ou l'embryon paraissent contenir une substance stimulant la ponte). C'est un bon voilier qu'on rencontre fréquemment dans les champs au moment de la maturation des grains (Danho & Haubruge, 2003). Il se multiplie dans les champs de maïs mais, surtout de façon plus importante dans les grains stockés et les greniers. Hors des greniers, *S. zeamais* est observé dans la nature (aux Etats-Unis) et dans des fruits de *Quercus sp* (Mills, 1989). Les conditions optimales de développement de *S. zeamais* sont à 27°C et 70% d'humidité relative. Dans ces conditions, les adultes peuvent pondre jusqu'à 450 œufs en quelques semaines avec une durée de cycle de développement (de la ponte à l'émergence des adultes) comprise entre 30 à 36 jours, mais peut aller jusqu'à 40 jours à 25°C (Delobel & Tran, 1993). Cette durée de développement varie en fonction de la température, de l'humidité relative et du substrat de ponte. Le développement de l'insecte est possible dans des grains ayant une teneur en eau élevée, c'est pourquoi il est capable d'infester les céréales, en particulier le maïs avant la récolte (Delobel & Tran, 1993). La longévité de l'insecte est de 3 à 5 mois et la fécondité est de 350 à 450 œufs par femelle. Les mâles sont plus actifs et vivent plus longtemps que les femelles. Baker (1987) indique que les adultes de *S. zeamais* sécrètent une phéromone d'agrégation (sitophinone) qui est active envers les deux sexes.

La femelle, grâce à son rostre, perce une cavité dans le grain et dépose un ou plusieurs œufs de préférence dans le tiers apical du grain (Delobel & Tran, 1993), puis elle referme l'orifice de ponte à l'aide d'un bouchon à substance mucilagineuse (Kossou & Bosque-Perez, 1998) sécrétée par l'oviducte qui durcit rapidement à l'air (Nardon, 1963). Cette stratégie protège efficacement les œufs contre les parasitoïdes, les prédateurs et les ovicides durant l'incubation et des grains apparemment sains peuvent être totalement infestés. Après l'incubation à l'intérieur du grain (8 à 11 jours), la larve L1 qui sort de l'œuf creuse au travers du grain une galerie qu'elle va élargir au fur et à mesure de sa croissance qui est entièrement cachée dans le grain. La larve après avoir subi quatre mues (4 stades larvaires) durant en moyenne 20 jours, se transforme en nymphe (stade nymphal de 6 à 7 jours) qui mue pour donner l'imago (Sharifi & Mills, 1971 ; Danho & Haubruge, 2003). Dans le premier stade larvaire trop vulnérable aux conditions de l'environnement (H.R., oxygène, densité de la population, température) selon Hardman (1978) et Longstaff (1981), on peut enregistrer jusqu'à 90% de mortalités larvaires. De tous les œufs déposés dans un grain, une seule larve se développe jusqu'à maturité suite à une compétition larvaire intense (Tilman, 1980). Cette compétition affecte le taux d'émergence des adultes, la capacité reproductive (Hawley, 1985 ; Mangel *et al.*, 1994) et la vigueur biologique des femelles issues de la progéniture (Prout & McChesney, 1985; Honek, 1993 ; Stejskal & Kučerová, 1996). En effet, ces femelles limitent l'agrégat des œufs et les distribuent sur plusieurs grains (vigueur biologique) pour réduire la compétition entre les larves, entraînant ainsi d'importantes pertes quantitative et qualitative (Giga & Smith, 1985).

I.2.4.1.4 Nature des dégâts et importance économique

Les pertes de grains de maïs dues aux charançons peuvent dépasser 25 % de la récolte (Helbig, 1995 ; Prates *et al.*, 1998). Dans les régions tropicales et subtropicales, *S. zeamais* figure parmi les ravageurs les plus destructeurs du maïs (Kossou *et al.*, 1992). L'insecte attaque principalement le maïs (spathes, grains entiers ou brisés et farine) et peut infester les grains aux champs avant même le stockage. En stockage, les pertes causées par cette espèce sont estimées à 4-5 % en 4 mois (Goergen, 2005), mais en 6 mois de stockage, elle peuvent dépasser 25 % (Prates *et al.*, 1998) et atteindre même 40 % (Gueye *et al.*, 2012). Il creuse des trous (Figure 4) et produit une poudre blanchâtre abondante qui rend le maïs impropre à la consommation (Freeman, 1980).

Cette espèce provoque des pertes sur les grains de maïs stocké par l'activité alimentaire des larves immatures et par la production de sciure issue du mélange de poussières, de matières fécales et des exuvies. Outre le maïs, *S. zeamaïs* peut infester d'autres denrées comme les grains entiers ou brisés de blé, de riz, de l'orge, du sorgho, du millet, l'igname, le manioc, les pâtes alimentaires, les racines et les graines de *Nelumbo nucifera*, la noix de *Garcinia kola* (petit kola). L'infestation de *S. zeamaïs* est souvent accompagnée de celle des moisissures, en particulier celle des *Aspergillus flavus* qui introduisent des taux élevés d'aflatoxines dans les produits alimentaires (Delobel & Tran, 1993).



Figure 4 : Dégâts causés par *S. zeamaïs* sur les grains de maïs (Source : Ngom, 2019)

1.2.4.2 *Prostephanus truncatus* (Horn)

Communément appelé le grand capucin du maïs (Larger Grain Borer), *P. truncatus* est un des plus importants ravageurs des céréales (Helbig, 1995), principalement le maïs stocké (Gueye *et al.*, 2008).

1.2.4.2.1 Origine et distribution

Originaire d'Amérique centrale (Philogène *et al.*, 1989), *P. truncatus* est un insecte qui a été signalé depuis fort longtemps sur le maïs en Chine dès 1878, en Europe puis en Afrique à la fin des années 1980. Cet insecte a été retrouvé pour la première fois en Afrique en 1981 en Tanzanie (Dunstan & Magazini, 1981). *Prostephanus truncatus* atteint le Kenya en 1983 (Kega & Warui, 1983), ensuite il a été signalé en 1984 au Togo (Krall, 1984) et en Bénin (Kossou, 1987). Il apparaît en Guinée Conakry en 1987 (Kolivogui & Mück, 1991) au Ghana en 1987 (Dick *et al.*, 1989), au Burkina Fasso en 1991 (Bosque-Perez *et al.*, 1991)

au Nigéria en 1992 (Pike *et al.*, 1992) et ce n'est qu'en 2007 que sa présence fût signalée pour la première fois au Sénégal (Gueye *et al.*, 2008).

I.2.4.2.2 Description morphologique et taxonomie

L'adulte de *P. truncatus* (Figure 5), appelé aussi *Dinoderus truncatus* ou *Stephanopachys truncatus*, est de couleur marron foncée, des antennes comportant 10 articles dont les trois derniers constituant une massue (Delobel & Tran, 1993). L'insecte a un corps cylindrique, une tête orientée vers le bas, et il mesure 3,5 à 5 mm de long.

La femelle se distingue du mâle par de longues et nombreuses tubercules sur sa tête, visibles au grossissement X40 % (Shires & McCarthy, 1976). La larve du grand capucin du maïs a trois paires de pattes, de couleur blanche, charnue et est couverte de quelques poils. *Prostephanus truncatus* ressemble beaucoup à *Rhyzopertha dominica*. L'extrémité tronquée de *P. truncatus* et sa grande taille permettent de le distinguer aisément par rapport à *R. dominica* (Goergen, 2005).

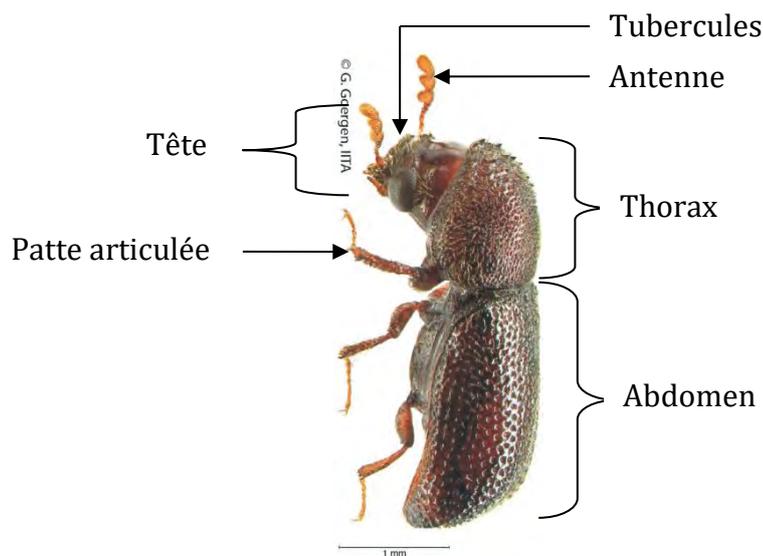
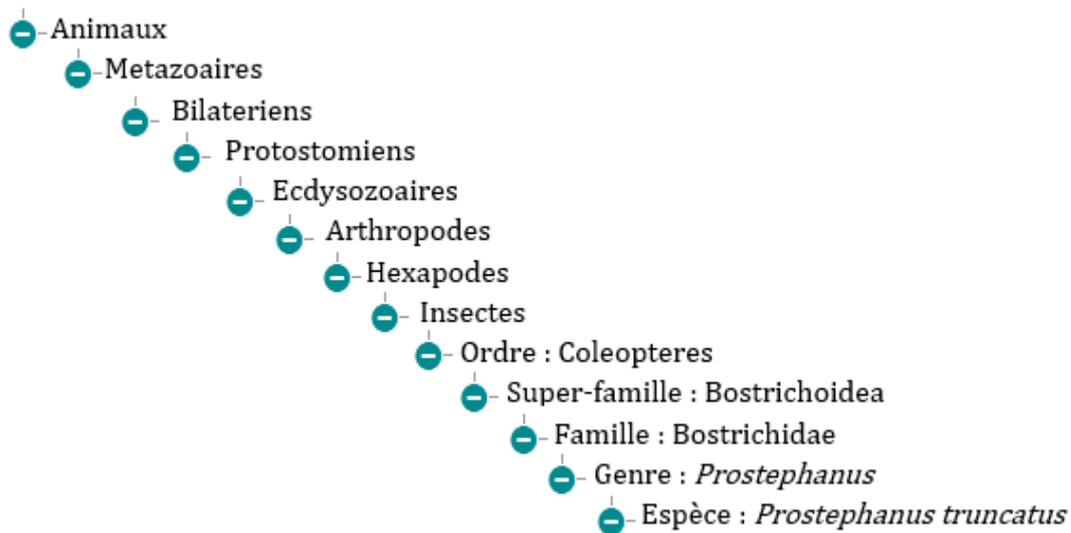


Figure 5 : Adulte de *Prostephanus truncatus* H. (Gorgen, 2005)

Taxonomie phylogénétique de *P. truncatus* (CABI, 2019; ITIS, 2019) est la suivante :



I.2.4.2.3 Bio-écologie

Dans les conditions propices de développement comprises 30-32°C et 70-80% H.R. (Shires, 1979 ; 1980 ; Bell & Watters, 1982), *P. truncatus* accomplit son cycle en moyenne 24 jours sur le maïs non égrené (Delobel & Tran, 1993). Le grand capucin peut se développer dans une très large fourchette de température et d'humidité, ce qui lui permet d'infester l'épi avant même la récolte, dès que la teneur en eau des grains atteint 40 à 50% (Delobel & Tran, 1993). Sa présence se signale sur l'épi par de petits trous bien nets à la surface des spathes. Selon Delobel et Tran (1993), les adultes de *P. truncatus* ont une longévité de 45 jours pour les mâles à 61 jours pour les femelles en moyenne. Selon Fleurat-Lessard (1996), l'adulte de *P. truncatus* peut vivre jusqu'à 8 mois. Le mâle sécrète une phéromone d'agrégation. La femelle perce des trous et dépose les œufs dans des galeries en cul-de-sac débouchant dans la galerie principale creusée dans le grain, ensuite, elle obstrue l'orifice de ponte à l'aide d'un bouchon gélatineuse. La larve une fois sortie de l'œuf, commence aussitôt à se nourrir du grain sans discrimination d'endosperme et de germe. Contrairement à *S. zeamaïs*, plusieurs adultes de *P. truncatus* peuvent émerger d'un seul grain, il n'y a donc pas de compétition larvaire dans un grain pour cette espèce. Les femelles déposent leurs œufs dans un intervalle de 95 à 100 jours et l'insecte peut déposer en moyenne 7,4 œufs dans chaque grain de maïs (Shires, 1980). Selon Li (1988), la femelle dépose en moyenne 8,4 œufs dans chaque grain de maïs, et peut pondre jusqu'à 600 œufs sur les épis et au plus 50 œufs seulement sur les grains égrenés (Bell & Watters, 1982).

L'insecte a un cycle de développement marqué par 3 stades larvaires qui prennent en moyenne 16 jours et un stade nymphal qui donne l'imago suite d'une mue.

I.2.4.2.4 Nature des dégâts et importance économique

Le grand capucin du maïs *P. truncatus* est reconnu comme dévastateur typique des récoltes des petits fermiers (Philogène *et al.*, 1989) et ravageur redouté sur le maïs de par sa mobilité, sa rapidité de pénétration et sa voracité (Verstraeten & Haubruge, 1987). Il attaque les grains de maïs sur l'épi, et peut être responsable d'énormes pertes dans les stocks des denrées alimentaires en général (Agbaka *et al.*, 1999) et dans les stocks de maïs en particulier (Hodges, 1982 ; Borgemeister *et al.*, 1994). *Prostephanus truncatus* s'attaque principalement au maïs qu'il broie complètement et le transforme en farine (Figure 6). S'attaquant aussi aux cossettes de manioc (Delobel & Tran, 1993 ; Goergen, 2005), le grand capucin du maïs est capable de se développer dans des semences forestières (Nansen & Meikle, 2002) et dans les bois (Nang'ayo, 1996 ; Gueye *et al.*, 2008). Cet insecte occasionne des pertes qui tournent autour de 9 et 34% (Hodges *et al.*, 1983), mais peut provoquer plus de 40% de pertes sur le maïs en 6 mois de stockage (Goergen, 2005). La larve ainsi que l'adulte consomment les grains entraînant des dégâts très élevés. Les adultes creusent des galeries de grain en grain produisant d'importantes quantités de poussières et détruisent 4 fois plus que la consommation de la larve et de l'adulte (Holst *et al.*, 2000). En plus des réduction des quantités et du pouvoir germinatif du maïs, ce Coléoptère augmente l'humidité des grains (Demianyk & Sinha, 1987 ; Osipitan *et al.*, 2012), facilitant ainsi leur contamination par les champignons (Lamboni & Hell, 2009).



Figure 6 : Dégâts causés par *P. truncatus* sur les grains de maïs (Source : Ngom, 2019)

I.3 Méthodes de lutte contre les insectes des stocks

La lutte contre la destruction des produits récoltés par des espèces d'insectes nuisibles, ou la limitation de leur prolifération, a longtemps fait appel à plusieurs méthodes.

I.3.1 Méthodes traditionnelles

I.3.1.1 La prévention

Les moyens traditionnels préventifs de protection employés sont surtout des structures adéquates de stockage telles que les barrières mécaniques (sacs, greniers, magasins, murs, zinc, fûts,...). Il y'a aussi des mesures strictes d'hygiène comme le nettoyage des locaux, la suppression des résidus de maïs des récoltes précédentes, le remplacement des bois endommagés et infestés, l'obstruction des trous et fissures sur les murs, *etc.* Les producteurs font aussi un tri et retrait des épis endommagés et/ou infestés, et un tamisage des grains pour récupérer des insectes et des impuretés qui pourront être responsables d'une infestation primaire. Il y'a aussi la réutilisation des variétés de maïs traditionnelles, qui ont une bonne herméticité de spathes leur conférant plus de résistance aux infestations d'insectes que les variétés hybrides améliorées (Omontecho, 1986 ; Kossou *et al.*, 1993). Ces mesures constituent une base essentielle de toute lutte contre les ravageurs.

I.3.1.2 Procédés physico-mécaniques

Plusieurs procédés et substances ont été utilisés dans ce sens, comme les poudres minérales et terres de diatomées constituées de particules abrasives qui adsorbent les lipides cuticulaires et entraîne la mort par dessiccation ou déshydratations de l'insecte (Balachowsky, 1962 ; CEEMAT, 1988). L'exposition des denrées au rayonnement solaire chasse les insectes adultes qui ne supportent pas les fortes chaleurs et la lumière intense (Murdock & Shade, 1991 ; Sembène *et al.*, 2006 ; Guèye *et al.*, 2011). L'utilisation de cendre et de sable dans la denrée entrave la mobilité des insectes en intervenant au niveau de leur motricité (Zehrer *et al.*, 1981 ; Wegmann, 1983). Bien que cette méthode donne de résultats satisfaisants, son application n'est possible qu'en milieu confiné.

I.3.1.3 Utilisation des substances végétales

Les plantes ont été longtemps utilisées comme insecticide dans certaines régions en Afrique avant qu'elles ne fassent l'objet de plusieurs études scientifiques.

De nombreux programmes de recherche sur les plantes à propriétés insecticides ont été initiés et plusieurs principes actifs biocides ont été identifiés. Certaines plantes se sont révélées très efficaces pour la lutte contre les insectes comme *Azadirachta indica* (neem) (Schmutterer & Ascher, 1984 ; Makanjuola, 1989 ; März, 1989 ; Pascual *et al.*, 1990), *Boscia senegalensis* (Seck *et al.*, 1996), *Hyptis spicigera* (Sanon *et al.*, 2002), *Chenopodium ambrosioides* (Tapondjou *et al.*, 2002), *Cymbopogon shoenanthus* et *Lavandula* (*sp*) (Delobel & Malonga, 1987 ; Papachristos & Stamopoulos, 2002), *Ocimum basilicum* et *O. gratissimum* (Kéita *et al.*, 2001), *Chenopodium ambrosioides* et *Eucalyptus saligna* (Tapondjou *et al.*, 2003), *etc.* Ce bon nombre de résultats, qui est loin d'être exhaustif, met en évidence l'importance des propriétés répulsives, anti-appétences et létales des plantes contre les insectes. Malgré les résultats quelques fois prometteurs, l'applicabilité de cette méthode en milieu réel pose un problème.

I.3.2 Méthodes modernes

I.3.2.1 Lutte biologique

La lutte biologique consiste à utiliser des espèces animales appelées auxiliaires (micro-organismes, prédateurs, parasites ou parasitoïdes) ou des espèces végétales afin de réduire les populations des ravageurs. Ainsi, plusieurs stratégies de luttés biologiques ont été réalisées (Arbogast, 1985). La lutte par entomophages (insectes auxiliaires) qui consiste à faire des lâchers de prédateurs d'insectes se nourrissant des œufs ou des larves de ravageurs. Il y'a aussi la lutte par entomopathogènes (microbiologique) comme l'utilisation des Baculovirus (virus spécifiques des Arthropodes) qui infectent les larves de Lépidoptères, de Coléoptères,... La lutte par autocide se fait par des lâchers de mâles stérilisés, en compétition avec les mâles sauvages dans la nature. Ces mâles lâchés vont s'accoupler avec des femelles qui produiront des œufs non féconds, ce qui réduit la population de l'espèce ciblée. On peut également citer la lutte par confusion, utilisant des molécules naturelles de communication chimique des insectes. Parmi eux nous avons les phéromones sexuelles (intrasécifiques) qui désorientent l'insecte et évitent l'accouplement, et les phéromones d'agrégation, substances allélochimiques (intersécifiques) qui attirent les insectes dans des pièges. Il faut cependant noter que l'on a accordé peu d'importance à la lutte biologique (Stein, 1986) du fait de la complexité de sa mise en œuvre.

I.3.2.2 Lutte physique

La lutte physique est une forme de lutte qui regroupe des techniques qui ne font pas appel aux processus biologique, biochimique ou toxicologique (Panneton *et al.*, 2000). Plusieurs procédés sont utilisés dans cette méthode de lutte. Nous pouvons en citer la modification du milieu en conditions létales, en agissant sur les températures ($T^{\circ}\text{C} < 5^{\circ}\text{C}$ ou $> 45^{\circ}\text{C}$), et sur l'atmosphère par diminution d'oxygène ($< 1\%$ d' O_2) (Cruz *et al.*, 1988), augmentation de gaz carbonique (60%) et de nitrogène (97 à 99%) (Jay & D'Orazio, 1983 ; Adler, 1994) en vue d'asphyxier des insectes. On peut également faire recours à l'usage de radiations comme les rayonnements à ondes courtes (gamma) et de chocs mécaniques (vibrations, ultrasons,...) qui détruisent efficacement les œufs et les larves des insectes. Il y'a aussi l'utilisation des barrières mécaniques comme les fûts métalliques ou plastiques hermétiques (Seck *et al.*, 1996) empêchant le contact insecte-dénrée sans incidence sur le pouvoir germinatif des grains.

I.3.2.3 Lutte chimique

Les insecticides chimiques sont des produits issus de la synthèse chimique (composé synthétique ou semi-synthétique) ayant la propriété de tuer les insectes, à court ou à long terme. En milieu paysan, le traitement des cultures ou des denrées alimentaires avec des insecticides chimiques s'applique traditionnellement en routine, notamment par contact et par pulvérisation (fumigation). Le traitement par contact consiste à recouvrir les grains, l'emballage ou les locaux de stockage d'une pellicule de produit insecticide qui agit par contact des déprédateurs, avec un effet plus ou moins rapide et une persistance d'action plus longue. Les fumigants (phosphure d'hydrogène, acide cyanhydrique, tétrachlorure de carbone, dibromure d'éthylène, oxyde de propylène, oxyde d'éthylène, *etc*) sont des produits qui, à une température et une pression données, se trouvent sous une forme gazeuse, à des concentrations suffisantes pour exercer des actions létales sur tous les stades d'un ravageur donné. L'intérêt majeur de la fumigation est de faciliter la pénétration des gaz à l'intérieur du grain et donc de détruire les œufs, larves et nymphes qui s'y développent (Cruz *et al.*, 1988). Pour les denrées stockées, il est généralement utilisé des produits organophosphorés, des pyréthriinoïdes de synthèse (Haubruge, 1987) et des produits composés à partir de deux matières actives appartenant à ces deux familles.

L'emploi de ces insecticides par les foyers agricoles, bien que justifié sur les plans économiques et techniques (Albert, 1992), devrait être accompagné par des structures compétentes (Gwinner *et al.*, 1996) pour s'assurer d'une utilisation raisonnée. Avant d'utiliser un insecticide, il est indispensable de bien connaître ses propriétés, ainsi que son comportement dans diverses conditions d'emploi (Plarre *et al.*, 1993). Dans bon nombre de cas, la protection chimique des stocks a contribué à la réduction des dégâts et des pertes de poids des grains. Cependant, la lutte chimique n'est pas toujours appliquée avec maîtrise et discernement, ce qui entraîne des dégâts considérables sur la santé des consommateurs et sur l'environnement (Regnault-Roger, 2002). En plus de ces effets néfastes, la résistance des insectes constatée (Georghiou, 1990; Benhalima *et al.*, 2004) redoute fortement l'utilisation des insecticides de synthèse. Face à toutes ces contraintes, il est nécessaire de chercher des alternatives de lutttes intégrées moins controversées.

I.3.2.4 Résistance variétale

I.3.2.4.1 Notion et concepts

La notion de résistance, très utilisée par les chercheurs, aussi bien dans la théorie que dans la pratique, se rapporte à une plante ou à une partie d'une plante donnée (les grains dans le cas d'espèce) qui fait partie intégrante de la lutte intégrée, en vue de relever le défi de la protection des cultures et des stocks contre les nuisibles.

Les mécanismes de la résistance des grains aux attaques des insectes peuvent se définir à deux niveaux distincts (Delobel & Tran, 1993). Un des mécanismes se trouve au niveau de l'espèce végétale ou du groupe d'espèces végétales. A ce niveau, il a été constaté une présence de substances ou de caractéristiques physiques défensives empêchant toute attaque d'un végétal donné par la plupart des insectes. L'autre mécanisme se trouve au niveau variétal. Il est plus précis et permet à une forme donnée d'une espèce végétale (variété par exemple) de préserver tout ou une partie de son potentiel biotique face à l'agression d'un bioagresseur, au moment où les autres formes (variétés) ne possèdent pas cette caractéristique vis-à-vis du même ravageur. C'est à ce second type de résistance que ce travail s'intéressera.

La résistance variétale des grains à l'infestation des insectes ravageurs des denrées stockées, maintenue de façon durable, constituerait la meilleure méthode de lutte pour les petits agriculteurs. L'obtention de cette résistance dans une variété agronomiquement intéressante nécessite beaucoup d'investigations et de patience car les variétés

généralement dotées de ces caractéristiques de résistance sont des espèces sauvages, non comestibles ou ayant des rendements très faibles. Selon le mécanisme mis en jeu, nous distinguons plusieurs définitions de la résistance variétale.

1.3.2.4.2 Définition des termes de la résistance variétale

La résistance variétale peut être définie comme étant la capacité d'une certaine variété à subir moins d'attaques et de pertes que d'autres variétés si elles sont toutes soumises à une même population d'insectes dans les mêmes conditions. Le terme de résistance recouvre les concepts de résistance verticale et de résistance horizontale.

- **Résistance verticale**

Cette résistance est contrôlée par un gène majeur et ne couvre seulement que des races spécifiques d'un bioagresseur. Souvent, il existe une relation gène pour gène pour le bioagresseur. C'est une résistance évidente qui s'affaiblit souvent au fil du temps, à mesure que le gène virulent se répartit dans la population du bioagresseur (Kim, 1992).

- **Résistance horizontale**

C'est une résistance polygénique, qui introduit un concept qui fait l'objet de discussion depuis 1963 (Singh & Singh, 1992) . C'est un processus plus long, mais dont la durabilité des résultats est accrue et permet souvent au bioagresseur de survivre et de se développer mais à un taux de croissance très bas (Kim, 1992).

Les différents types de résistance variétale peuvent être regroupés en trois grandes catégories selon les mécanismes d'action : antibiose, antixénose (non-acceptation) et tolérance.

- **Antibiose**

On parle d'antibiose lorsque les composants de l'hôte exercent des effets négatifs sur le développement, la survie ou la reproduction de l'organisme nuisible qu'il héberge (Wiseman, 1985 ; Mihm, 1985 ; Mihm, 1997 ; Tefera *et al.*, 2016). Il a souvent pour conséquence une réduction de la fertilité et de la fécondité des insectes, un allongement du cycle de développement, une réduction de la taille et du poids, un comportement anormal, des malformations et / ou la mort de l'insecte (Wiseman, 1985 ; Khan, 1997).

➤ **Antixénose** (« non-acceptation» ou « non-préférence »)

On parle d'antixénose quand l'hôte est rejeté par l'insecte comme source de nourriture ou site de ponte. Ainsi, l'insecte est obligé de chercher des hôtes alternatifs (Khan, 1997 ; Cardona & Sotelo, 2005 ; Tefera *et al.*, 2016).

➤ **Tolérance**

Elle permet au végétal résistant (variété) de supporter les populations de ravageurs qui causeraient d'énormes dégâts aux variétés plus sensibles. C'est la capacité des plantes à se réparer et à se remettre des dommages causés par les insectes pour continuer de croître et de se reproduire (Smith, 1997 ; Tefera *et al.*, 2016) mais n'empêche pas l'infestation et les dégâts des parasites.

Ce mécanisme ne se produit pas après la récolte, puisque les grains stockés sont des structures dormantes, avec une suspension temporaire de la croissance et une activité métabolique réduite (Amen, 1968 ; García-Lara *et al.*, 2003).

De nombreux travaux de recherche et de sélection ont été réalisés sur la résistance variétale, et sont en cours dans de nombreux pays (Seck *et al.*, 1992 ; Seck, 1993 ; Lale & Yusuf, 2001 ; Appleby & Credland, 2003). L'utilisation de variétés résistantes dans le cadre de la protection des grains stockés devrait être soutenue davantage pour une bonne gestion des ravageurs dans des conditions de production en Afrique (Abebe *et al.*, 2009).

**CHAPITRE II : SENSIBILITE VARIETALE AUX DEUX RAVAGEURS MAJEURS DU
MAÏS STOCKE ET COMPORTEMENT REPRODUCTIF DES ESPECES**

INRODUCTION

Le maïs (*Zea mays* L.), largement cultivé en Amérique, en Asie et dans certaines régions d'Afrique, fournit des nutriments aux humains et aux animaux et représente à lui seul plus de 20 % des calories alimentaires dans certaines régions d'Afrique et d'Amérique centrale (Shiferaw *et al.*, 2011). En Afrique subsaharienne, la production est généralement saisonnière, tandis que les besoins des consommateurs s'étendent sur toute l'année (Ngamo & Hance, 2007). Le maïs sert de nourriture à de nombreuses populations et couvre les périodes de soudure dans certaines parties des pays d'Afrique (Guèye *et al.*, 2008 ; Adjile, 2012). Introduit depuis les années 1960 au Sénégal, le maïs est depuis lors devenu une filière agro-industrielle presque au même titre que le riz, visant à résorber le déficit vivrier pour une meilleure sécurité alimentaire du pays. Ainsi, le stockage des récoltes de maïs devient l'un des facteurs-clés de la sécurité alimentaire des populations. Malgré son importance capitale dans le régime alimentaire, sa culture est confrontée à plusieurs contraintes tels que les facteurs édaphiques défavorables (baisse de la pluviométrie et de la fertilité du sol) qui engendrent et accentuent la stagnation voire la baisse récurrente de sa production (ISRA & CIRAD, 2005). A cela s'ajoutent les déprédations constantes par les ravageurs lors de sa croissance en milieu paysan et de son entreposage jusqu'à son utilisation (CSA, 2010). Les déprédateurs, qui non seulement détruisent une forte quantité des plantes et des récoltes, rendent également les grains ou la farine de maïs impropres à la consommation. Au Sénégal, comme dans la plupart des pays du Sahel, la conservation des récoltes en vue d'assurer la disponibilité permanente des ressources alimentaires constitue un goulot d'étranglement pour la majorité des producteurs. Il est constaté que le maïs entreposé subit souvent des pertes supérieures à 20 % entre la récolte et la consommation, dues à l'infestation par les insectes, en particulier les Coléoptères tels que le charançon du maïs, *Sitophilus zeamais* M. et le grand capucin du maïs, *Prostephanus truncatus* H. (Verstraeten & Haubruge, 1987 ; Pantenius, 1988 ; Kossou *et al.*, 1993 ; Borgemeister *et al.*, 1994 ; Helbig, 1995 ; Bergvinson & García-Lara, 2004 ; Phillips & Throne, 2010 ; Muatinte *et al.*, 2019). L'activité de ces Coléoptères est quelque peu facilitée par la précarité des structures de stockage (Ndiaye *et al.*, 2005), mais également par les nouvelles variétés de maïs mises au point pour leur fort rendement, et qui sont particulièrement sensibles à ces types d'insectes (Philogène *et al.*, 1989).

Les mesures prises pour réduire les pertes du maïs stocké étaient essentiellement chimiques, puis les fumigations et ensuite les structures de stockage hermétiques. Cependant, la plupart des agriculteurs n'ont pas les moyens d'accéder aux structures de stockage hermétique ou aux produits chimiques adéquats pour réduire les pertes durant la conservation. Face à ce fléau, une utilisation de variétés moins sensibles aux attaques des insectes constituerait une meilleure méthode de lutte pour le petit agriculteur dépourvu de toute nouvelle technologie de stockage. Au Sénégal, la sensibilité des variétés de maïs vis-à-vis des attaques d'insectes granivores, pratiquement inconnue, peut sans doute être mieux exploitée, afin de protéger efficacement ses stocks et de réduire l'usage des produits chimiques.

Dans cette optique, deux Coléoptères particulièrement connues pour leur voracité envers le maïs entreposé ont été choisis, *Sitophilus zeamais* M. et *Prostephanus truncatus* H. Couramment appelé charançon du maïs, *S. zeamais* prolifère surtout dans le maïs égrené et *P. truncatus*, ou le grand capucin du maïs, commence l'attaque des grains de maïs depuis l'épi au champ.

Ce chapitre a trois objectifs spécifiques :

- **OS1** : Evaluer la sensibilité des grains des principales variétés de maïs cultivées au Sénégal à l'infestation de *S. zeamais* M. et de *P. truncatus* H. ;
- **OS2** : Caractériser les interactions interspécifiques entre *P. truncatus* H. et *S. zeamais* M. ;
- **OS3** : Evaluer la préférence de ponte de *P. truncatus* H. et de *S. zeamais* M. en fonction des variétés de maïs.

II.1 Matériel et Méthodes

II.1.1 Matériel

II.1.1.1 Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé comme substrat au cours des expérimentations est constitué de grains des neuf variétés de maïs (Tableau 1) homologuées et cultivées au Sénégal (FAO, 2012). Les variétés Early-Thaï, SWAN, DMR-ES, Tzee-White et Tzee-Yellow nous ont été fournies par la Direction de la Coopérative des Producteurs de Semences d'Arachide et de Maïs (COPROSA-Nioro du Rip/Sénégal). Les variétés Obatampa, Across-Pool, Synth-C et Synth-9243 sont collectées au service des semences du Centre National de Recherches Agronomiques (CNRA-ISRA/Sénégal).

Ces variétés de maïs séchées sous le soleil après la récolte, n'ont subi aucun traitement d'insecticide. Avant leur utilisation lors des bio-essais, les grains ont été placés pendant au moins trois semaines dans un congélateur à -5 °C pour éliminer toute possible infestation.

Tableau 1 : Variétés de maïs homologuées et cultivées au Sénégal (FAO, 2012).

Variété	Nom vernaculaire	Date d'obtention	Date d'homologation	Nature génétique	Lieu de sélection	Vocation culturale	Cycle maturité	Rendement potentiel en grains	Type de grain	Couleur grain
Across-Pool	Xéewel Gi	1986	2009	Composite	Ibadan, Nigeria	Culture pluviale (Sud de Thiès, Kaolack, Fatick)	75 – 80 jas	2 – 3 t/ha	Corné-denté	blanc
Early-Thaï	Noor 96	1990	3 mars 2009	Composite	Thaïlande	Culture irriguée ; pluviale (Fleuve Sénégal ; Kaolack, Fatick, Sénégal oriental, Casamance)	80 jas	2 – 3 t/ha	Corné	jaune
DMR-ES	Doo Mer	1996	3 mars 2009	Composite	Ibadan, Nigeria	Culture pluviale (Kaolack, Fatick, Sénégal oriental, Casamance)	80 jas	2,5 t/ha	Corné-denté	blanc
Tzee-Yellow	Sooror	1996	3 mars 2009	Composite	Ibadan, Nigeria	Culture pluviale (Sud de Thiès, Kaolack, Fatick)	75 – 80 jas	2 t/ha	Corné-denté	jaune
Tzee-White	Gaaw Na	1996	3 mars 2009	Composite	Ibadan, Nigeria	Culture pluviale (Fatick, Kaolack)	75 – 80 jas	2 t/ha	Corné-denté	blanc
Synth-9243	Jaboot	1997	3 mars 2009	Synthétique	Thaïlande	Culture pluviale (Kaolack, Fatick, Sénégal oriental, Casamance)	90 – 95 jas	3 – 4 t/ha	Corné-denté	blanc
SWAN	Goor Yomboul	1998	3 mars 2009	Composite	Thaïlande	Culture pluviale (Kaolack, Fatick, Sénégal oriental, Casamance)	90 – 100 jas	3 – 4 t/ha	Corné	jaune
Obatampa	Yaayi Séex	1998	3 mars 2009	Composite	Ghana	Culture pluviale (Kaolack, Fatick)	95 – 100 jas	3 t/ha	Corné-denté	blanc
Synth-C		1983	3 mars 2009	Synthétique	IRAT/ ISRA (Sénégal)	Culture pluviale (Kaolack, Fatick, Sénégal oriental, Casamance)	90 jas	3,5 t/ha	semi-denté	blanc

II.1.1.2 Insectes

La souche de *S. zeamaïs* utilisée a été collectée dans des échantillons de maïs de l'équipe de recherche GENGESPOP de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD-Sénégal). Celle de *P. truncatus* a été obtenue au niveau du laboratoire phytosanitaire de l'Institut de Technologie Alimentaire (ITA-Sénégal). Les individus des deux espèces ont été mis en élevage à partir de mars 2017, au Laboratoire d'Entomologie et d'Acarologie de la Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD (Sénégal). Plusieurs générations ont été obtenues à partir des techniques d'élevage de masse. Ces élevages ont été réalisés dans des bocaux en verre remplis à moitié (environ 250 g de grains/bocal) avec des grains d'une variété de maïs différente des neuf testées dans cette étude. Dans chaque bocal, 20 adultes d'âge et de sexe indéterminés ont été introduits. Après 14 jours d'oviposition, les adultes ont été retirés des grains. Les grains infestés sont laissés en incubation dans un insectarium à température et humidité relative ambiantes (25 - 35° C et 70 - 80 % H.R.) jusqu'à l'émergence de nouveaux adultes. L'infestation artificielle des échantillons a été réalisée avec de jeunes adultes de même âge (deux à trois jours au maximum) émergeant de cet élevage.

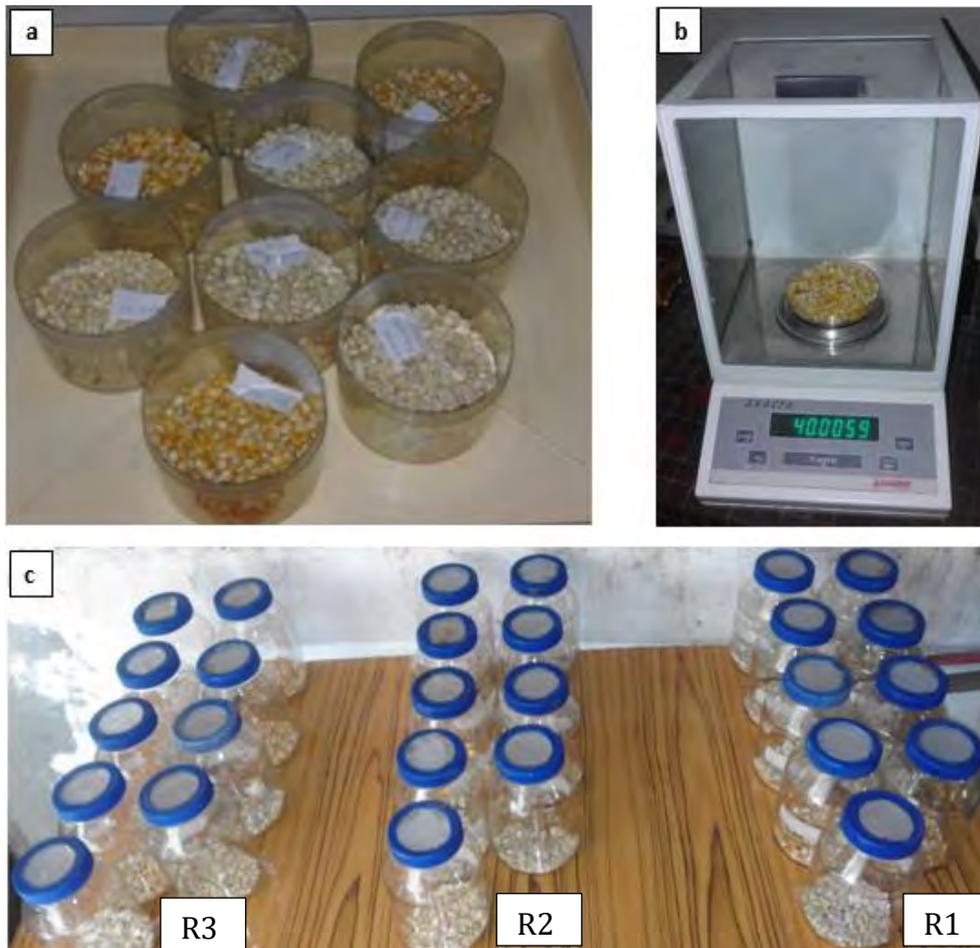
II.1.2 Méthodes

II.1.2.1 Criblage variétal pour la sensibilité du maïs aux attaques des insectes

La discrimination de la sensibilité variétale du maïs a été effectuée par une infestation artificielle sans choix, qui est mieux appropriée pour un criblage de variétés candidates à une sélection (Kossou *et al.*, 1993).

Pour chacune des variétés de maïs (Figure 7a), trois répétitions de 60 g de grains ont été mesurées avec une balance de haute précision ($\pm 0,0001$ g) (Figure 7b) et introduites chacune dans un bocal en verre à couvercle aéré avec un grillage de 2 mm de maille (Figure 7c). Dans chaque bocal, trois jeunes couples âgés d'au plus deux jours ont été introduits pendant 14 jours. Le nombre de grains des 60 g de chaque variété a été noté en amont et en aval de l'infestation. Après les 14 jours d'oviposition, les adultes ont été retirés et les grains ont été placés dans un insectarium à température et humidité relative ambiantes (25 - 35°C et 70 - 80 % H.R) pour incubation des œufs jusqu'au 20^{ième} jour. Ensuite un décomptage hebdomadaire des émergences a été effectué du 20^{ième} au 55^{ième} jour du test.

Les insectes ont été séparés quotidiennement des grains pendant la période d'émergence (F₁).



R1 = répétition 1 :
Variétés 1 à 9 + insectes

Figure 7 : Dispositif de criblage variétal au laboratoire

Après les 55 jours de suivi, les paramètres ci-dessous ont été déterminés.

1. Effectif des descendants F₁ (Eff) : progéniture des trois jeunes couples
2. Poids des individus émergés

3. Taux de multiplication par femelle : $Tm/\varphi = \frac{\text{Eff}}{\text{Nb_parents femelles}}$

4. Capacité nette de multiplication $Cnm = \frac{\text{Nb_total individus}}{\text{Nb_parents}}$

5. Durée moyenne de développement (Dmd) : durée (jours) écoulee entre mi-période de ponte des couples parents et le moment où 50 % des descendants ont émergé (Dobie, 1977).

$$Dmd = \sum_{i=1}^n Di \times \frac{1}{n}$$

n = nombre total d'individus émergés, Di = durée de développement d'un individu i

6. Taux d'accroissement par semaine $Tas = \frac{Cnm \times 7}{Dmd}$

7. Indice de susceptibilité de Dobie (IS) à l'attaque de l'espèce:

$$IS = \frac{[\ln(Eff) \times 100]}{Dmd}$$

L'indice de susceptibilité de Dobie, allant de 0 à 11 (Dobie, 1974 ; Abebe *et al.*, 2009 ; Demissie *et al.*, 2015), a été utilisé pour classer les variétés de maïs selon leur degré de sensibilité.

- IS de 0 à 4 = variétés classées résistantes
- IS de 4,1 à 7,0 = variétés modérément résistantes
- IS de 7,1 à 10,0 = variétés sensibles
- IS \geq 10,1 = variétés classées hautement sensibles

8. Pourcentage d'attaque $A(\%) = \frac{Nb_grains\ endommagés}{Nb_total\ grains} \times 100$

9. Pourcentage de pertes pondérales des grains est calculé suivant la méthode de comptage et pesage de Boxal (1986):

$$\% \text{ Pertes} = \frac{(B \times E) - (C \times D)}{E (B + C)} \times 100$$

B = nombre de grains endommagés
E = poids de grains sains
C = nombre de grains sains
D = poids de grains endommagés

II.1.2.2 Evaluation du pouvoir germinatif des grains attaqués

Parmi les nombreuses méthodes de tests de germination, il en existe quatre plus suggérées que sont la méthode dessus du papier, la méthode entre les papiers, la germination dans le sable et la méthode avec agar. Dans ce travail, la méthode de germination « dessus du papier absorbant » décrite par Rao *et al.* (2007) a été utilisée, en remplaçant le papier absorbant par un coton comme substrat de germination.

Pour lever les dormances (inhibiteurs) physiologiques, les grains ont été trempés dans de l'eau pendant une demi-journée, puis rincés avec de l'eau de javel à 3% en vue d'éliminer toute infestation probable par des moisissures. Le coton a été aussi désinfecté au préalable à l'autoclave (Figure 8a) à 130 °C durant 30 minutes.

Concrètement, dans des bacs à 52 alvéoles (Figure 8b) désinfectés par stérilisation de surface avec de l'eau de javel, un coton imbibé d'eau distillée a été introduit dans chaque alvéole. Sur chaque coton, un grain de maïs a été déposé, puis les bacs ont été placés dans une étuve réglée à 30 °C. Pour chaque variété, 20 grains attaqués par *S. zeamaïs*, 20 grains attaqués par *P. truncatus* et 20 grains non attaqués (témoins) ont été disposés dans un bac étiqueté avec le nom de la variété (Figure 8c).

Les grains ont été maintenus en humidité, en y rajoutant quelques gouttes d'eau distillée au besoin, pour les permettre de germer correctement, bien que les alvéoles laissent couler l'eau au fond pour éviter leur pourriture. Il a été considéré comme grain germé (Figure 8d) lorsque la racine (appelée radicelle à ce stade) mesure au moins 2 cm de long (Baskin & Baskin, 1998). A ce stade « germé », le grain est alors retiré du lot, pour éviter un double comptage. Ainsi, sur une feuille datée, les résultats de la germination ont été notés tous les 24 Heures. Le délai de germination du maïs étant compris entre 3 et 7 jours dans des températures de 35°C à 20°C respectivement, le suivi de la germination a été effectué durant 5 jours.

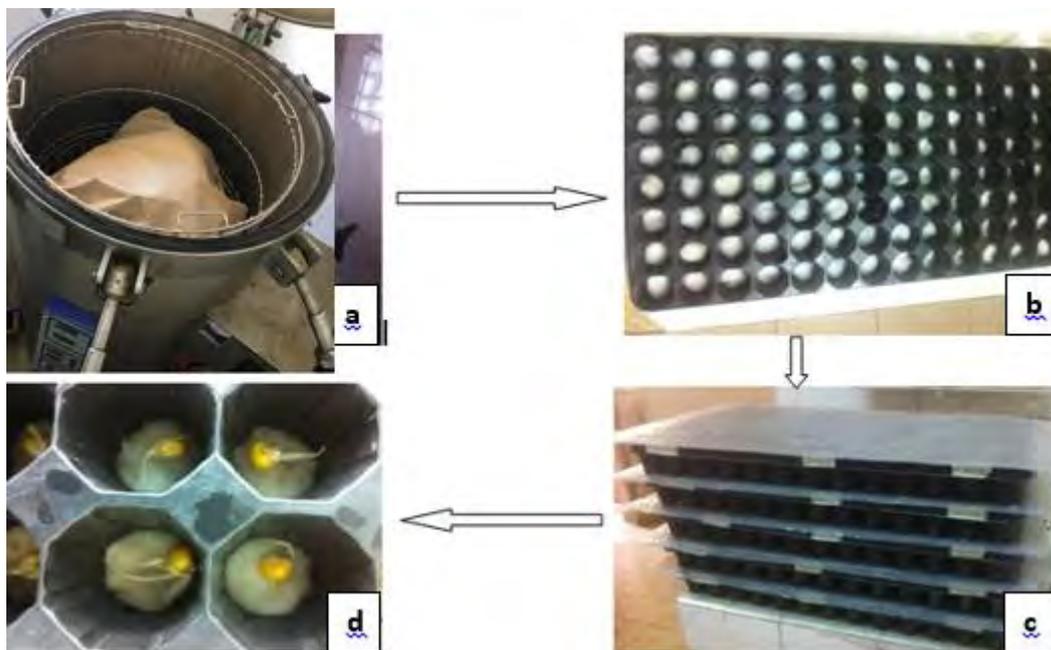


Figure 8 : Dispositif expérimental pour le test de germination

A la fin du suivi, les paramètres suivants ont été évalués :

Taux de germination (grains non attequés et grains attequés) : il correspond à la moyenne des pourcentages de grains qui ont germé au terme du suivi. Il est calculé selon la formule

$$TG (\%) = \frac{n}{N} \times 100 ; \text{ avec}$$

n = nombre cumulé de grains germés des observations,

N = nombre total de grains mis en germination

II.1.2.3 Evaluation de la préférence variétale des insectes (tests choix libre)

Concernant ce test, les neuf variétés de maïs ont été mises à une disposition de choix libre pour les espèces. Trente (30) g de grains par variété ont été placés à équidistance de 25 couples de chaque espèce (Figure 9a) avec une permutation de positions en répétions.

Le dispositif a été recouvert d'un grillage de maille de 2 mm (Figure 9b) et répété trois fois. Un suivi a été réalisé toutes les 24 heures pour décompter le nombre d'adultes présents sur chaque lot de variété (occurrence). Pour la reproduction des insectes, ce même dispositif a été effectué sans dérangement de l'oviposition pendant 14 jours pour *S. zeamais*. En suite, les adultes ont été retirés et les grains ont été mis dans des bocaux et placés dans l'insectarium pour un suivi des émergences de la descendance F₁. Quant à *P. truncatus*, durant les 14 jours d'oviposition, les adultes ont été retirés toutes les 48 heures, remis au centre en vue d'optimiser leur choix puisqu'ils ont un déplacement réduit. Un décomptage hebdomadaire des émergences a été effectué du 20^{ième} au 55^{ième} jour du test.

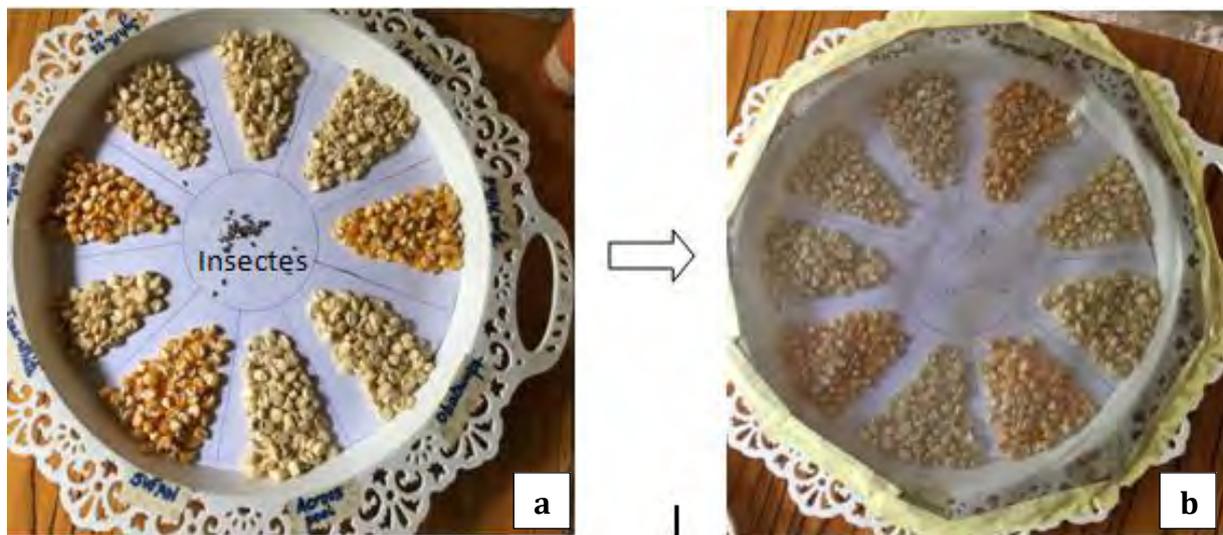


Figure 9 : Dispositif expérimental de test de préférence variétale des insectes

Ce procédé a permis d'évaluer les paramètres suivants :

- abondance des espèces sur chaque variété (occurrence) durant les 14 jours ;
- préférence d'hôte de reproduction (émergence de la première génération F₁) ;
- pourcentage de grains attaqués pour chaque variété ;
- pourcentage de pertes pondérales des grains pour chaque variété selon la méthode de Boxal (1986)

II.1.2.4 Compétition interspécifique

La compétition entre *S. zeamais* et *P. truncatus* a été évaluée avec la variété SWAN. Cette variété a été choisie suite aux précédents tests sur la sensibilité (infestation sans choix) des 9 variétés à *S. zeamais* et à *P. truncatus* qui avaient indiqués que seule la variété SWAN avait le même profil de résistance (modérément résistante) vis-à-vis des deux espèces.

Ainsi, trois couples âgés de trois jours au maximum pour chaque espèce ont été mis ensemble dans un bocal contenant 120 g de grains sains à trois répétitions. Quatorze (14) jours après cette infestation artificielle, les adultes ont été retirés et les bocaux ont été mis dans l'insectarium pour une incubation des œufs. A partir du 20^{ième} jour après l'introduction des adultes, un comptage hebdomadaire des émergences a été effectué jusqu'au 55^{ième} jour (35 jours de suivi des émergences).

II.1.2.5 Tolérance interspécifique (Sélection de grains hôtes).

Pour cet essai, 10 couples âgés de deux à trois jours de l'espèce ont été placés dans des environnements contenant quatre prises d'essai de 20 g d'une même variété de maïs (Figure 10). Les deux prises d'essai sont constituées de grains non infestés et les deux autres sont constituées de grains préalablement infestés par l'autre espèce 10 jours avant. Le dispositif (combinaison espèce-grains) a été effectué en trois répétitions. Les insectes déposés au centre du dispositif, ont la possibilité de circuler entre les échantillons et donc de choisir librement leurs grains hôtes de préférence. Après 14 jours de ponte, les insectes ont été retirés et les grains ont été placés dans des bocaux en verre pour incubation des œufs à l'insectarium à température et humidité relative ambiantes (25 à 35 ° C et 70 à 80% H.R.) pour un suivi des émergences en F₁. Un décomptage hebdomadaire des émergences a été effectué du 20^{ième} au 55^{ième} jour du test. La sélection de grain-hôtes préférés de l'espèce a été évaluée par le nombre d'adultes émergés dans chaque type de grains.



Figure 10 : Dispositif de sélection des grains pour l'oviposition

II.1.3 Analyses statistiques

Les données ont été saisies sur Excel et traitées avec le logiciel R (versions R-3.0.0 et R-3.4.1) suivant les recommandations de Bloomfield (2014). Des tests paramétriques (ANOVA à un facteur et Tukey) ont été utilisés pour analyser les variances après vérifications et validations de la normalité (test de normalité de Shapiro-wilk) et de l'homogénéité des variances (test de Bartlett) des séries de données. Des tests non paramétriques (Kruskal-Wallis et Wilcoxon) ont été utilisés pour analyser les données dont les séries ne suivaient une loi normale et/ou qui n'avaient une variance homogène. La comparaison des moyennes, des écart-types et des variances, a permis de ressortir la significativité des différences de moyennes. Puisque le nombre de nos séries de données (27) était inférieur à 30, les analyses de liaisons (matrices de corrélations) ont été effectuées avec la méthode Spearman au lieu celle de Pearson (qui exige au moins 30 séries) pour déterminer des interactions entre des variables. La significativité statistique a été appréciée sur la base des p-values :

" . "	$P \geq 0,05$	non significative
" * "	$0,05 > P \geq 0,01$	moyennement significative
" ** "	$0,01 > P \geq 0,001$	très significative
" *** "	$P < 0,001$	hautement significative

II.2 Résultats et discussion

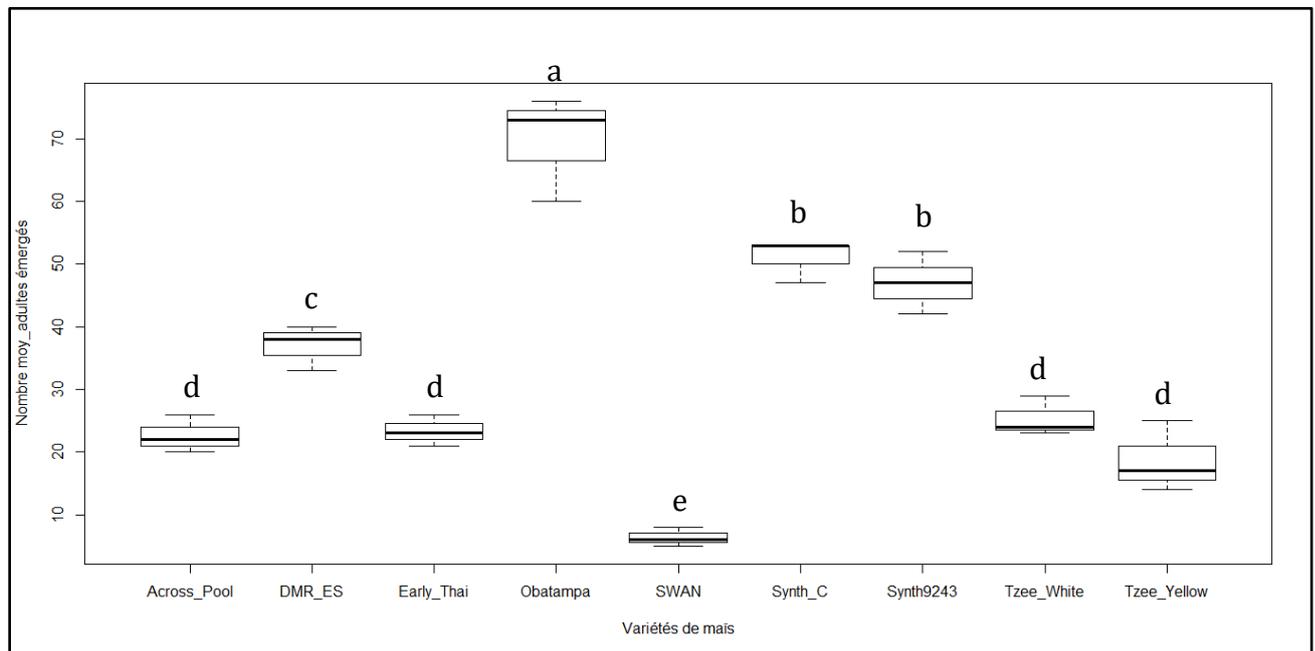
II.2.1 Sensibilité variétale du maïs

II.2.1.1 Sensibilité du maïs vis-à-vis de *S. zeamaïs*.

II.2.1.1.1 Effectif de la descendance F_1 (Eff) de *S. zeamaïs*.

Le résultat de la première génération d'adultes (Figure 11) montre que tous les grains des neuf variétés de maïs sont favorables au développement de l'insecte. Dans chaque échantillon, des émergences d'adultes ont été enregistrées. L'analyse de variance du nombre d'insectes émergés des grains montrent une différence significative ($p\text{-value} < 0,001$) entre les variétés. Nous avons constaté que le facteur variété a un effet significatif sur l'effectif de la descendance F_1 . Le nombre d'adultes le plus élevé est enregistré dans les variétés Obatampa ($69,67 \pm 8,50$), Synth-C ($51,00 \pm 3,46$) et Synth-9243 ($47,00 \pm 5,00$). Ces variétés se révèlent plus favorables au développement de *S. zeamaïs*. Par contre, les variétés SWAN ($6,33 \pm 1,53$), Tzee-Yellow ($18,67 \pm 5,69$), Across-Pool ($22,67 \pm 3,06$) et Early-Thaï ($23,33 \pm 2,52$), ont enregistré très peu d'émergences d'adultes, 2 fois moins importantes que dans le groupe précité.

Ceci indique que ces variétés sont moins favorables au développement de *S. zeamais* dans les conditions expérimentales décrites.



Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre les variétés à $\alpha = 0,05$ lors du test de Tukey après le test ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 11 : Répartition des émergences en F₁ de *S. zeamais* selon les variétés

II.2.1.1.2 Dynamique de la reproduction de *S. zeamais* en F₁

Une forte variation des paramètres de performance du charançon a été constatée suivant les variétés (Tableau 2).

La durée moyenne de développement de la progéniture de *S. zeamais* dans les grains varie de façon significative (p -value < 0,001) sous l'effet du facteur variété. La durée de développement la plus courte a été enregistrée avec la variété Obatampa ($30,72 \pm 0,58$ jours). Les variétés Obatampa, Synth-C et Synth-9243 ont présenté des taux de multiplication par femelle ($T_m/\text{♀}$) et d'accroissement par semaine (T_a/s) très élevés confirmant ainsi qu'elles représentent un support alimentaire très favorable au développement de *S. zeamais*. L'étude montre que le poids des adultes issus des variétés les plus favorables au développement des insectes (Obatampa, Synth-C et Synth-9243) est plus élevé que celui des insectes issus des variétés moins favorables (Tzee-White, Tzee-Yellow, Early-Thai et DMR-ES) à l'exception de celui de deux variétés (SWAN et Across-Pool).

Tableau 2 : Caractéristiques de performances de *S. zemaïs* vis-à-vis des variétés.

<i>Variétés</i>	<i>Eff_Adul</i>	<i>Dmd (jours)</i>	<i>Tm/ ♀</i>	<i>Ta/s</i>	<i>Poids adulte (mg)</i>
Across-Pool	22,67±3,06 ^d	33,18±0,64 ^c	7,56±1,50 ^d	0,86±0,45 ^{cd}	2,81±0,04 ^a
DMR-ES	37,00±3,61 ^c	38,51±0,87 ^{ba}	12,33±1,00 ^c	1,23±0,23 ^c	2,38±0,002 ^c
Early-Thaï	23,33±2,52 ^d	37,16±1,12 ^b	7,78±1,50 ^d	0,77±0,12 ^d	2,19±0,04 ^d
Obatampa	69,67±8,50 ^a	32,72±0,58 ^c	23,22±4,62 ^a	2,64±0,33 ^a	2,56±0,10 ^{bc}
SWAN	6,33±1,53 ^e	36,38±1,20 ^b	2,11±1,07 ^e	0,21±0,01 ^e	2,60±0,02 ^{ba}
Synth-9243	47,00±5,00 ^b	33,45±1,11 ^c	15,67±1,67 ^b	1,71±0,26 ^{bc}	2,65±0,10 ^{ba}
Synth-C	51,00±3,46 ^b	33,18±0,27 ^c	17,00±1,15 ^{ab}	1,85±0,12 ^b	2,52±0,17 ^{bc}
Tzee-White	25,33±3,21 ^d	40,36±0,87 ^a	8,44±2,14 ^d	0,80±0,14 ^d	1,20±0,03 ^e
Tzee-Yellow	18,67±5,69 ^d	36,18±0,78 ^b	6,22±1,68 ^d	0,64±0,34 ^d	1,25±0,02 ^e
Significativité (p-values)	***	***	***	***	***

Significativité de la comparaison globale entre variétés du test ANOVA (alpha = 0,05) : " . " non significatif, " * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif.

Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre variétés à alpha = 0,05 lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

II.2.1.1.3 Paramètres de sensibilité des variétés aux attaques de *S. zemaïs*

Les dommages causés par le charançon du maïs varient significativement en fonction des variétés (Tableau 3). L'effet variétal est significatif (p-value = 1,69e⁻⁰⁵) sur les variations de l'indice de susceptibilité (IS) des grains à l'attaque de *S. zemaïs*. La variété SWAN est celle dont les grains ont subi le moins d'attaque (4,35±0,61%) et de pertes (0,29±0,02 %). Son IS (6,09±0,29) révèle qu'elle est une variété modérément résistante. Les variétés Obatampa, Synth-C et Synth-9243 se sont avérées hautement sensibles à l'infestation de *S. zemaïs* (IS ≥10,1). Les variétés Tzee-White, Across-Pool, DMR-ES, Tzee-Yellow et Early-Thaï sont sensibles (IS compris entre 7,1 et 10,0) à l'attaque de *S. zemaïs*. Les variétés susceptibles ont enregistrées plus d'attaques et de pertes pondérales. Cet indice a discriminé les variétés selon leurs niveaux de sensibilités et nous a permis de les classer en trois catégories (trois variétés hautement susceptibles, cinq variétés susceptibles, une variété modérément résistante).

Tableau 3 : Caractéristiques de sensibilité des grains à l'attaque de *S. zeamaïs*

Variétés	% d'attaque	% de pertes	IS	Catégorie Resistance
<i>Across-Pool</i>	10,42±0,97 ^c	1,34±0,27 ^b	9,60±0,40 ^c	S
<i>DMR-ES</i>	13,76±2,97 ^{bc}	1,56±0,12 ^b	9,39±0,41 ^c	S
<i>Early-Thai</i>	10,95±1,46 ^c	1,41±0,37 ^b	8,84±0,66 ^c	S
<i>Obatampa</i>	28,41±9,57 ^a	3,36±0,87 ^a	13,51±1,12 ^a	HS
<i>SWAN</i>	4,35±0,61 ^d	0,29±0,02 ^c	6,09±0,29 ^d	MR
<i>Synth-9243</i>	19,34±3,54 ^{ab}	1,87±0,44 ^{ab}	10,87±1,08 ^{bc}	HS
<i>Synth-C</i>	22,08±2,75 ^a	2,50±0,36 ^a	12,22±0,63 ^{ab}	HS
<i>Tzee-White</i>	13,78±2,79 ^{bc}	1,53±0,42 ^b	9,82±0,08 ^c	S
<i>Tzee-Yellow</i>	9,33±1,69 ^c	0,94±0,16 ^b	9,05±0,88 ^c	S
Significativité (p-values)	***	***	***	

Significativité de la comparaison globale entre variétés du test ANOVA (alpha = 0,05) : " . " non significatif, " * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif.

Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre variétés à alpha = 0,05 lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

MR = modérément résistante, S = sensible et HS = hautement sensible.

II.2.1.1.4 Proportion des pertes en fonction du nombre de *S. zeamaïs* émergés

Les coefficients de régressions de la méthode de corrélation de Spearman (ρ , ρ^2 , a, b) ont permis de déterminer le degré de liaison entre le nombre d'adultes de *S. zeamaïs* qui émerge et le pourcentage de pertes pondérales des grains. L'effectif des insectes en F₁ est fortement et positivement lié aux pertes de poids des grains (Figure 12) avec un fort coefficient de corrélation ($\rho = 0,736$) statistiquement différent de zéro ($p_{(\rho)} = 1,21e^{-05}$). La corrélation représentée sous forme de fonction linéaire $y = ax + b$ permet d'établir la nature et le degré de la liaison entre la progéniture de l'insecte et les pertes de poids des grains. La détermination des constantes **a** ($a = 0,028$; p-value = $4,13e^{-05}$) et **b** ($b = 0,691$; p-value = 0,0096), toutes différentes de zéro d'après leurs p-values, permet d'établir l'équation sous forme de $y = 0,028x + 0,691$. La variable **y** étant dépendante, ou endogène ou encore variable à expliquer, représente les pertes de poids des grains et la variable **x** étant indépendante, ou exogène ou variable explicative constitue le nombre d'adultes qui émergent. Ainsi, nous avons l'équation de la liaison des deux variables sous forme **Perte_PG = 0,028 * Eff_ad + 0,691**. Selon le coefficient de détermination ρ^2 ($\rho^2 = 0,496$; p-value = $4,133e^{-05}$), le nombre d'adultes émergés explique à 50% les pertes de poids des grains.

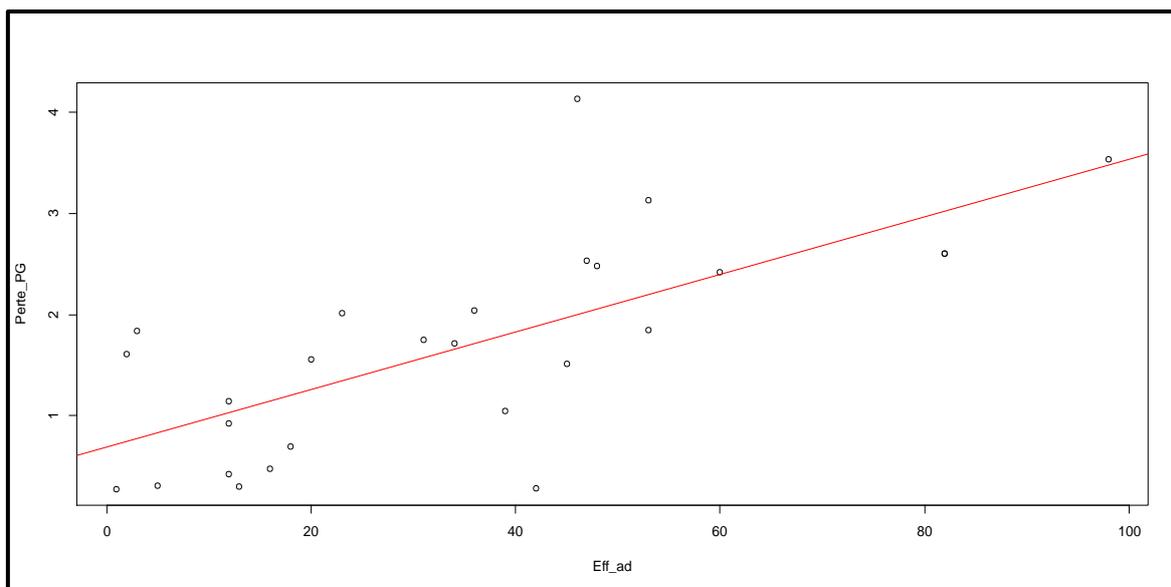


Figure 12 : Corrélation entre le nombre d'individus émergés et les pertes

II.2.1.1.5 Analyses de corrélations entre les paramètres évalués

La matrice de corrélation de Spearman (Tableau 4) a mis en évidence des corrélations binaires significatives entre les variables de sensibilité variétale et les paramètres biologiques de *S. zeamais*. Le nombre de descendants du charançon en F₁ est très fortement et positivement lié au pourcentage d'attaque ($\rho = 0,969$; $p_{(\rho)} < 0,001$), aux pertes de poids des grains ($\rho = 0,736$; $p_{(\rho)} < 0,001$) et à l'indice de susceptibilité des variétés ($\rho = 0,861$; $p_{(\rho)} < 0,001$). Les résultats révèlent également des corrélations négatives entre le cycle de développement du charançon et le poids des adultes ($\rho = -0,628$; $p_{(\rho)} = 0,0004$), les pertes pondérales ($\rho = -0,401$; $p_{(\rho)} = 0,0381$) et l'indice de susceptibilité des variétés de maïs ($\rho = -0,426$; $p_{(\rho)} = 0,0269$). Ces interactions suggèrent que plus le cycle de développement est prolongé, moins le poids des adultes et les pertes pondérales sont importants, et par conséquent moins la variété est susceptible aux infestations de *S. zeamais*.

Tableau 4 : Matrice de corrélations entre les paramètres de sensibilité

Variables	EFF	Attaques	Pertes	Ta/s	Poids_Adul	Tm/♀	Dmd	IS
EFF	1							
Attaques	0,969***	1						
Pertes	0,736***	0,762***	1					
Ta/s	0,980***	0,940***	0,744***	1				
Poids_Adul	0,243.	0,183.	0,219.	0,257.	1			
Tm/♀	0,993***	0,962***	0,729***	0,989***	0,224.	1		
Dmd	-0,294.	-0,279.	-0,401*	-0,380.	-0,628***	-0,289.	1	
IS	0,861***	0,860***	0,843***	0,872***	0,225.	0,850***	-0,426*	1

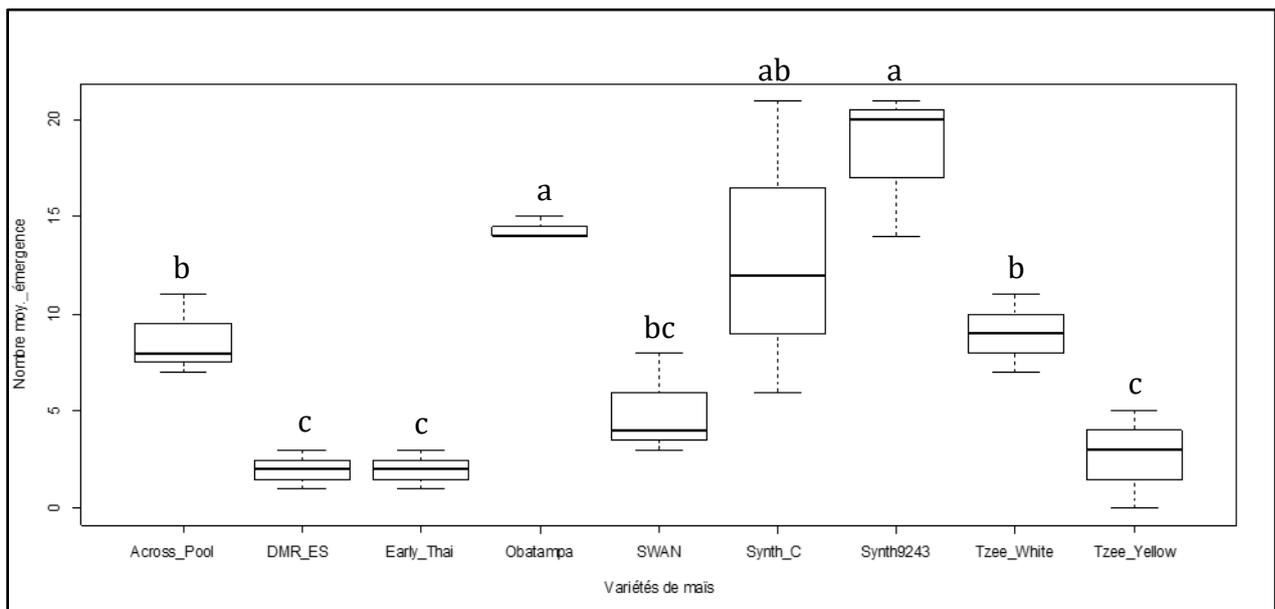
" * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif ; "." non significatif

EFF = effectif des émergences en F₁, **Attaques** = pourcentage d'attaque des grains, **Pertes** = pertes de poids des grains, **Tas** = taux d'accroissement par semaine, **Poids_Adul** = poids des adultes qui émergent, **Tmf** = taux de multiplication par femelle, **Cycle** = cycle moyen de développement des insectes et **IS** = indice de susceptibilité de Dobie.

II.2.1.2 Sensibilité variétale du maïs vis-à-vis de *P. truncatus*.

II.2.1.2.1 Effectif de la descendance en F₁ (Eff) de *P. truncatus*.

Dans toutes les variétés testées, des émergences d'adultes de *P. truncatus* sont enregistrées (Figure 13). Les neuf variétés de maïs se sont montrées favorables au développement de l'insecte, à des degrés différents. L'analyse de variance des émergences d'insectes sur les lots de grains révèle une différence significative (p -value = $3,1e^{-05}$) entre les variétés. Le facteur variété a un effet significatif sur l'effectif de la descendance en F₁ du grand capucin du maïs. Le nombre d'adultes le plus élevé est enregistré avec les variétés Synth-9243 ($18,33 \pm 3,79$), Obatampa ($14,33 \pm 0,58$) et Synth-C ($13,00 \pm 3,61$). Ces variétés se sont avérées plus favorables au développement de *P. truncatus*. Par contre, les variétés Early-Thaï ($2,00 \pm 1,00$), DMR-ES ($2,00 \pm 1,00$) et Tzee-Yellow ($2,67 \pm 1,53$) ont enregistré très peu d'émergences d'adultes, plus de 5 fois moins importantes que le groupe susmentionné. Ce résultat indique qu'elles sont moins favorables au développement de *P. truncatus* dans les conditions expérimentales décrites.



Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre les variétés à $\alpha = 0,05$ lors du test de Tukey après le test ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 13 : Répartition des émergences en F₁ de *P. truncatus* selon les variétés

II.2.1.2.2 Dynamique de la reproduction de *P. truncatus* en F₁

Une forte variabilité des paramètres de performance du grand capucin du maïs est enregistrée en fonction des variétés (Tableau 5). La durée moyenne de développement juvénile de *P. truncatus*, évaluée sur les grains des différentes variétés varie de façon significative (p -value = $5,36e^{-05}$). Les taux de multiplication par femelle ($Tm/\text{♀}$) et d'accroissement par semaine (Ta/s) ont été plus élevés dans les variétés Synth-9243, Obatampa et Synth-C. Ces variétés se sont avérées très favorables au développement de *P. truncatus*.

Tableau 5 : Caractéristiques de performances de *P. truncatus* vis-à-vis des variétés

Variétés	Eff. Adultes	Dmd (jours)	Tm/♀	Ta/s
Across-Pool	8,67±2,08 ^b	33,54±0,36 ^b	2,89±0,20 ^c	0,31±0,02 ^d
DMR-ES	2,00±1,00 ^c	34,25±0,75 ^b	0,67±0,33 ^e	0,07±0,04 ^e
Early-Thaï	2,00±1,00 ^c	30,33±0,52 ^c	0,67±0,33 ^e	0,08±0,04 ^e
Obatampa	14,33±0,58 ^a	31,64±0,74 ^c	4,78±0,19 ^b	0,53±0,04 ^b
SWAN	5,00±1,00 ^{bc}	37,00±0,00 ^a	1,67±0,37 ^d	0,16±0,01 ^e
Synth-9243	18,33±3,79 ^a	31,10±0,81 ^c	6,11±0,51 ^a	0,69±0,07 ^a
Synth-C	13,00±3,61 ^{ab}	31,42±0,08 ^c	4,33±0,58 ^b	0,48±0,09 ^{cb}
Tzee-White	9,00±2,00 ^b	28,74±0,26 ^c	3,00±0,07 ^c	0,37±0,02 ^{cd}
Tzee-Yellow	2,67±1,53 ^c	31,73±0,07 ^c	0,89±0,25 ^{ed}	0,10±0,02 ^e
Significativité (p-values)	***	***	***	***

Significativité de la comparaison globale entre variétés du test ANOVA ($\alpha = 0,05$) : " " non significatif, " * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif.

Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre variétés à $\alpha = 0,05$ lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

II.2.1.2.3 Paramètres de sensibilité des variétés aux attaques de *P. truncatus*.

Les dommages causés par *P. truncatus* varie significativement en fonction des variétés (Tableau 6). L'effet variété est significatif sur les variations de l'indice de susceptibilité (p -value < 0,001) sur les pourcentages d'attaques (p -value < 0,001) et de pertes pondérales (p -value < 0,001) des grains. Les variétés Early-Thaï, DMR-ES et Tzee-Yellow ont les plus petits IS (2,88±0,23 ; 3,05±0,09 ; 3,75±0,30 respectivement). Les IS de ces dernières étant inférieurs à 4, par conséquent elles sont classées comme variétés résistantes à l'infestation de *P. truncatus*. Contrairement, les variétés Synth-9243, Obatampa et Synth-C, avec des IS 3 fois plus élevés (9,72±0,17 ; 9,74±0,52 ; 9,76±0,24 respectivement) se révèlent sensibles à l'infestation du grand capucin du maïs. Les variétés SWAN, Across-Pool et Tzee-White ont des IS compris entre 4,1 et 7 ; ainsi, elles sont classées comme variétés modérément résistantes aux attaques de *P. truncatus*.

Les niveaux d'attaques et de pertes pondérales, qui résultent à la fois des activités alimentaires des adultes et des larves, varient significativement entre les variétés. Certaines variétés de la catégorie modérément résistantes (Across-Pool et Tzee-White) ont subi plus de dommages que d'autres qui sont classées susceptibles (Obatampa et Synth-C).

Tableau 6 : Paramètres de sensibilité des grains à l'attaque de *P. truncatus*.

Variétés	% d'attaque	% de pertes	IS	Catégorie Resistance
Across-Pool	5,23±0,48 ^{ab}	1,68±0,32 ^d	6,05±0,12 ^c	MR
DMR-ES	5,12±0,64 ^{ab}	1,77±0,20 ^d	3,05±0,09 ^e	R
Early-Thai	1,10±0,18 ^d	1,10±0,03 ^e	2,88±0,23 ^e	R
Obatampa	4,00±0,43 ^b	1,92±0,06 ^d	9,74±0,52 ^a	S
SWAN	2,53±0,42 ^c	2,53±0,42 ^c	6,01±0,06 ^c	MR
Synth-9243	6,59±0,77 ^a	3,80±0,21 ^a	9,72±0,17 ^a	S
Synth-C	4,42±0,35 ^b	2,98±0,31 ^{bc}	9,76±0,24 ^a	S
Tzee-White	5,79±0,48 ^a	3,19±0,20 ^b	6,94±0,31 ^b	MR
Tzee-Yellow	2,59±0,11 ^c	1,81±0,20 ^d	3,75± 0,30 ^d	R
Significativité (p-values)	***	***	***	

Significativité de la comparaison globale entre variétés du test ANOVA (alpha = 0,05) : " . " non significatif, " * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif.

Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre variétés à alpha = 0,05 lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Sensibilité variétale : **R** = résistante, **MR** = modérément résistante et **S** = sensible

II.2.1.2.4 Proportion des pertes en fonction du nombre de *P. truncatus* émergés

Suivant la méthode de corrélation de Spearman, les coefficients de régressions (ρ , ρ^2 , a, b) évalués établissent le degré de liaison entre le nombre d'adultes de *P. truncatus* émergé et le pourcentage de pertes pondérales des grains. L'effectif de la descendance du grand capucin en F₁ est fortement et positivement lié aux pertes de poids des grains (Figure 14) avec un coefficient de corrélation ρ statistiquement différent de zéro ($\rho = 0,654$; $p_{(\rho)} = 0,0002$). La fonction de la corrélation se présente sous forme linéaire $y = ax + b$. Les valeurs des constantes **a** ($a = 0,117$; $p\text{-value} = 4,24e^{-05}$) et **b** ($b = 1,330$; $p\text{-value} = 1,32e^{-05}$), statistiquement différentes de zéro selon leurs p-values, donne l'équation sous forme de $y = 0,117 x + 1,330$. La variable dépendante, ou endogène ou variable à expliquer **y** représente les pertes de poids des grains et la variable indépendante, ou exogène ou variable explicative **x** constitue le nombre d'adultes émergé.

Ainsi, nous avons l'équation de la liaison des deux variables sous forme $Perte_{PG} = 0,117 * Eff_{ad} + 1,330$. La valeur du coefficient de détermination ρ^2 ($\rho^2 = 0,495$; $p\text{-value} = 4,236e^{-05}$), indique que le nombre d'adultes émergés explique à 50% les pertes de poids des grains.

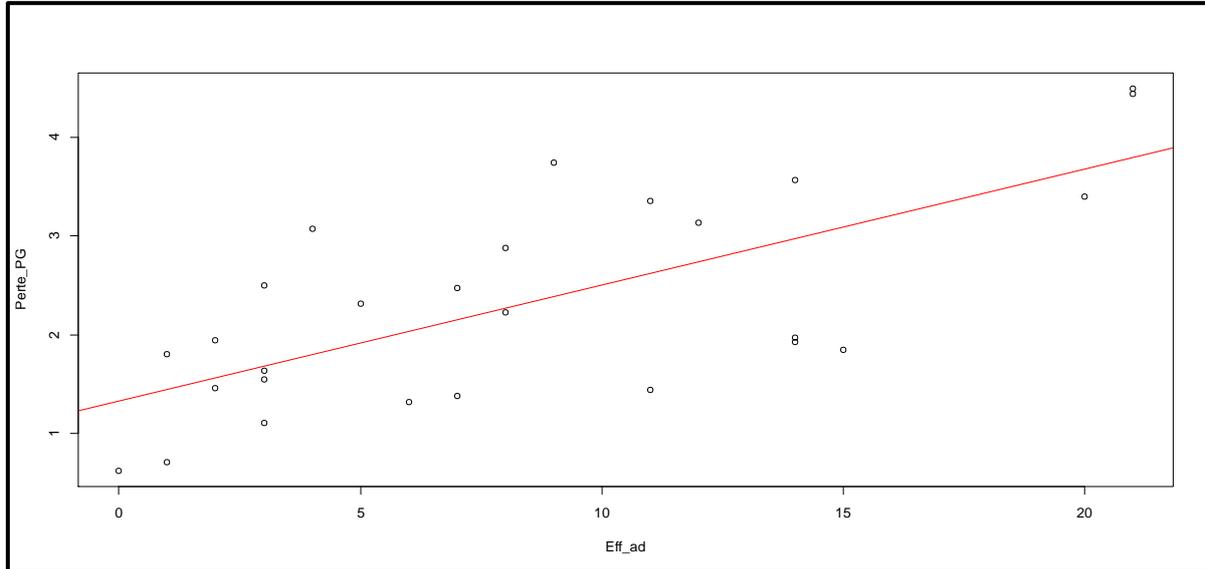


Figure 14 : Corrélation entre le nombre d'individus émergés et les pertes

II.2.1.2.5 Analyses de corrélations entre les paramètres évalués

Des corrélations binaires significatives sont enregistrées entre les variables de sensibilité variétale et les paramètres biologiques de *P. truncatus* (Tableau 7). Le nombre d'adultes émergés en F₁ est fortement et positivement corrélé au pourcentage d'attaque ($\rho = 0,62$; $p_{(\rho)} < 0,001$), aux pertes de poids des grains ($\rho = 0,65$; $p_{(\rho)} < 0,001$) et très fortement lié à l'indice de susceptibilité des variétés ($\rho = 0,85$; $p_{(\rho)} < 0,001$). Par contre la durée moyenne du cycle de développement du grand capucin du maïs n'est pas liée significativement aux pertes pondérales et à l'indice de susceptibilité des variétés de maïs.

Tableau 7 : Matrice de corrélations entre les paramètres de sensibilité

Variables	EFF	Attaques	Pertes	Tm/♀	Ta/s	Dmd	IS
EFF	1						
Attaques	0,62***	1					
Pertes	0,65***	0,68***	1				
Tm/♀	0,99***	0,62***	0,65***	1			
Ta/s	0,99***	0,61***	0,66***	0,99***	1		
Dmd	-0,28.	-0,14.	-0,12.	-0,28.	-0,36.	1	
IS	0,85***	0,45*	0,53**	0,85***	0,84***	-0,28.	1

" * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif ; "." non significatif

II.2.2 Taux de germination des grains de maïs attaqués

Le Tableau (8) résume le résultat du pouvoir germinatif des grains sains et attaqués par *S. zeamaïs* et par *P. truncatus* en conditions contrôlées au laboratoire (30 °C, obscurité). Le résultat révèle que toutes les variétés ont le même temps de latence, qui est supérieur à 24 heures (durée comprise entre le début du test et le moment où le premier grain a germé). Les grains ont commencé à germer à partir du deuxième jour et ont terminé au quatrième jour après le semis pour les neuf variétés testées. Toutes les variétés présentent un taux de germination supérieur à 60 % (grains sains) excepté la variété Tzee-White (40 % de germination). Après une infestation artificielle par le charançon du maïs, nous constatons une baisse drastique hautement significative (p-value < 0,001) du pouvoir germinatif des grains attaqués, qui devient 3 à 4 fois moins élevé que le pouvoir germinatif des grains sains.

Tableau 8 : Taux de germination des grains sains et attaqués pour chaque variété

Variétés	Germ. G. Tém. (%)	Germ. G.A.S. z. (%)	Germ.G.A.P. t. (%)	Significativité (p-values)
Across-Pool	90,17±0,95 ^a	22,17±0,12 ^b	4,16±0,15 ^c	***
DMR-ES	60,01±0,50 ^a	20,01±0,31 ^b	0,00±0,00 ^c	***
Early-Thai	90,00±2,65 ^a	30,00±1,00 ^b	5,00±1,00 ^c	***
Obatampa	95,61±1,15 ^a	14,27±1,23 ^b	2,63±0,36 ^c	***
SWAN	100,00±1,00 ^a	55,05±1,00 ^b	5,00±0,10 ^c	***
Synth-9243	100,00±2,00 ^a	13,59±1,03 ^b	2,20±1,05 ^c	***
Synth-C	84,35±1,07 ^a	16,14±0,87 ^b	2,80±0,57 ^c	***
Tzee-White	40,01±1,11 ^a	5,02±0,10 ^b	5,02±0,45 ^b	***
Tzee-Yellow	100,00±2,00 ^a	30,00±0,45 ^b	0,00±0,00 ^c	***

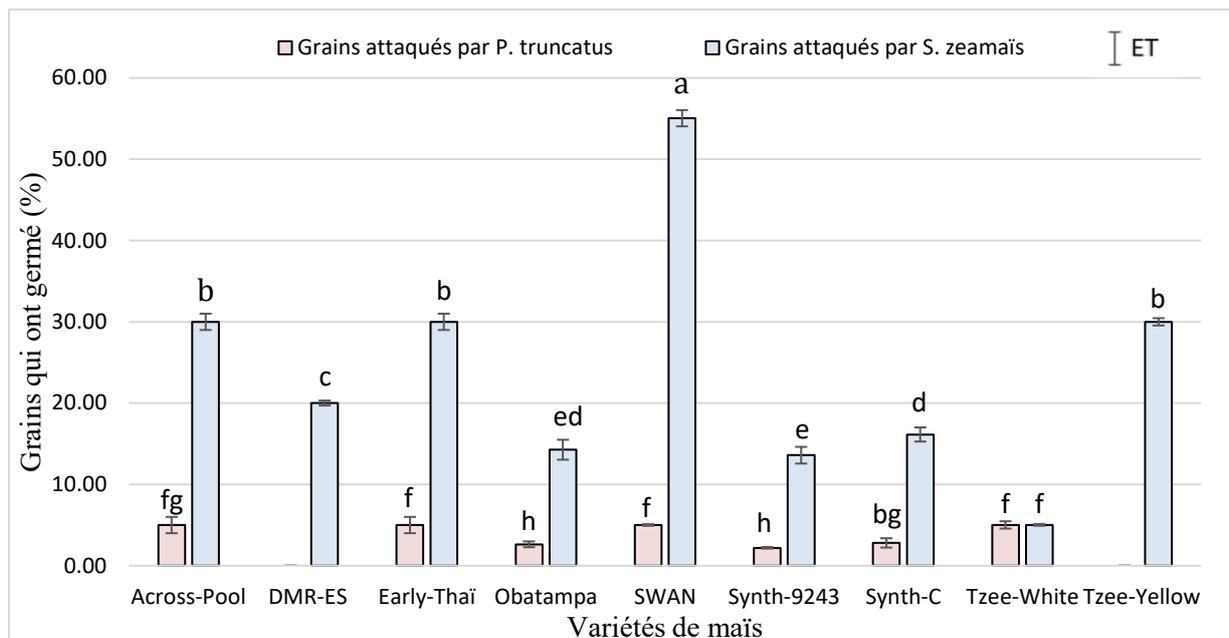
Germ. G. Tém. = Taux de germination des grains sains (Témoins) ;

Germ. G.A.S. z. = Taux de germination des grains attaqués par *S. zeamaïs*

Germ.G.A.P. t. = Taux de germination des grains attaqués par *P. truncatus*

Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre nature du grain à alpha = 0,05 lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Le test montre également une différence significative (p-value < 0,001) du pouvoir germinatif des grains attaqués entre les variétés et entre les espèces (Figure 15). Globalement, les grains attaqués par *P. truncatus* ont une capacité germinative très faible voire nulle pour certaines variétés (DMR-ES et Tzee-Yellow), largement plus faible que ceux attaqués par *S. zeamaïs*, à l'exception de Tzee-White. Les grains attaqués par *P. truncatus* présentent un taux de germination qui varie entre 0 et 5,01±0,45 %, alors que ceux attaqués par *S. zeamaïs* varie de 5,01±0,10 à 55,05±1,00 %.



Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre les variétés et entre les espèces d'insecte à alpha = 0,05 lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 15: Taux de germination des grains attaqués

II.2.3 Préférence variétale des insectes (choix libre)

II.2.3.1 Préférence variétale de *S. zeamaïs*

Les insectes sont retrouvés dans tous les lots des variétés avec une variation d'occurrence non significative (p -value = 0,206) entre les variétés (Tableau 9). Les adultes de *S. zeamaïs* étaient numériquement 3 fois plus fréquents sur les variétés DMR-ES, Synth-9243 et Early-Thai, avec $3,89 \pm 3,10$; $3,56 \pm 3,02$ et $3,44 \pm 2,14$ adultes respectivement toutes les 24 heures que sur les variétés SWAN et Tzee-Yellow. Le résultat indique également que le facteur variété influence la sélection d'hôte de ponte des femelles de *S. zeamaïs* de façon significative (p -value = 0,00016). Le nombre d'individus émergés de la variété Synth-9243 ($17,33 \pm 3,79$ adultes / 30 g de maïs) était statistiquement supérieur à ceux de toutes les autres variétés, avec un nombre 2 fois supérieur à celui de la variété suivante, DMR-ES ($7,67 \pm 2,43$ adultes/30 g de maïs). À l'inverse, le nombre d'insectes émergés des variétés Across-Pool ($1,00 \pm 0,40$ adultes/30 g de maïs) et Tzee-Yellow ($1,33 \pm 0,15$ adultes/30 g de maïs) était numériquement plus petit, soit un nombre deux fois inférieur à ceux de SWAN et d'Obatampa et 4 fois inférieur à ceux des variétés Early-Thai, Synth-C et Tzee-White. La variété SWAN est celle qui enregistre le moins d'attaque ($1,83 \pm 0,19$ %) et de pertes en poids ($0,26 \pm 0,08$ %).

A l'inverse, la variété Synth-9243 est celle qui a subi le plus d'attaque ($10,52 \pm 2,28$ %) et de pertes pondérales ($2,28 \pm 0,57$ %).

Tableau 9 : Dynamique des adultes et de la reproduction de *S. zeamais* en choix libre

Variétés	Occurrence (adultes/24h)	EFF (adultes/30g)	% d'attaque	% de Pertes
Across pool	1,56±1,26 ^a	1,00±0,40 ^c	2,13±0,36 ^{bc}	0,22±0,07 ^c
DMR-ES	3,89±3,10 ^a	7,67±2,43 ^b	4,07±1,86 ^b	0,95±0,19 ^b
Early-Thaï	3,44±2,14 ^a	4,33±1,53 ^{bc}	3,47± 1,11 ^b	0,59± 0,15 ^{bc}
Obatampa	1,22±0,19 ^a	2,00±0,80 ^c	2,37±0,80 ^{bc}	0,70±0,18 ^{bc}
SWAN	0,56±0,69 ^a	2,33±1,53 ^c	1,83±0,19 ^c	0,26±0,08 ^c
Synth-9243	3,56±3,02 ^a	17,33±3,79 ^a	10,52±2,28 ^a	2,28±0,57 ^a
Synth-C	1,22±1,07 ^a	4,67±1,51 ^{bc}	4,35±1,27 ^b	0,79±0,14 ^b
Tzee-White	1,33±1,33 ^a	4,33±1,79 ^{bc}	2,35±0,63 ^{bc}	0,61±0,15 ^{bc}
Tzee-Yellow	0,89±0,51 ^a	1,33±0,15 ^c	2,11±0,91 ^{bc}	0,50±0,13 ^c
Significativité (p-values)	0,206	0,00016	0,00026	0,00019

Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre variétés à alpha = 0,05 lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

II.2.3.2 Préférence variétale de *P. truncatus*

Les adultes de *P. truncatus* sont retrouvés sur toutes les variétés avec une variation d'occurrence significative (p-value = 0,0019) entre variétés (Tableau 10). Les insectes se trouvaient sur la variété Synth-C ($4,57 \pm 1,51$ adultes / 24 heures) 2 fois plus abondants que sur les variétés Obatampa, Synth-9243, DMR-ES et Early-Thaï, et 4 fois plus abondants que sur les variétés Tzee-White, Tzee-Yellow et Across-Pool. Les insectes étaient moins abondants sur la variété SWAN, soit $0,67 \pm 0,46$ adultes toutes les 24 heures. Le résultat des émergences de la progéniture F₁ n'a enregistré aucun individu pour cinq variétés (Across-Pool, Obatampa, SWAN, Tzee-White et Tzee-Yellow) sur les neuf testées. La variété Synth-C a enregistré le plus grand nombre d'émergences, avec en moyenne $6,00 \pm 2,65$ adultes pour 30 g de grains. La variété Early-Thaï ($2,00 \pm 0,58$ adultes/30 g) enregistre 3 fois moins d'émergence que Synth-C, mais 2 fois plus que les variétés Synth-9243 ($1,00 \pm 0,00$ adultes/30 g) et DMR-ES ($0,67 \pm 0,58$ adultes/30 g). Les dommages infligés aux grains de maïs par le grand capucin varient significativement selon les variétés évaluées. La variété Synth-C a subi plus d'attaques ($6,18 \pm 2,46$ %) et de pertes ($1,57 \pm 0,74$ %) suivie de Synth-9243, de DMR-ES et d'Early-Thaï. Les variétés Across-Pool, Obatampa, SWAN, Tzee-White et Tzee-Yellow n'ont enregistré ni d'attaques ni de pertes.

Tableau 10 : Dynamique des adultes et de la reproduction de *P. truncatus* en libre choix

Variétés	Occurrence (adultes/24h)	EFF (adultes/30g)	% d'attaques	% de Pertes
Across pool	1,90±1,21 ^b	0,00±0,00 ^c	0,00±0,00 ^d	0,00±0,00 ^c
DMR-ES	2,81±0,30 ^{ab}	0,67±0,58 ^c	1,65±1,43 ^c	0,56±0,49 ^b
Early-Thai	2,33±1,33 ^{ab}	2,00±0,58 ^b	1,20±1,04 ^c	0,35±0,30 ^b
Obatampa	2,19±0,64 ^{ab}	0,00±0,00 ^c	0,00±0,00 ^d	0,00±0,00 ^c
SWAN	0,67±0,46 ^b	0,00±0,00 ^c	0,00±0,00 ^d	0,00±0,00 ^c
Synth-9243	2,62±0,08 ^{ab}	1,00±0,00 ^c	3,05±0,06 ^b	0,96±0,02 ^{ba}
Synth-C	4,57±1,51 ^a	6,00±2,65 ^a	6,18±2,46 ^a	1,57±0,74 ^a
Tzee-White	1,29±0,38 ^b	0,00±0,00 ^c	0,00±0,00 ^d	0,00±0,00 ^c
Tzee-Yellow	1,33±0,59 ^b	0,00±0,00 ^c	0,00±0,00 ^d	0,00±0,00 ^c
Significativité (p-values)	0,0019	2,76e-05	4,66e-06	3,63e-05

Les lettres a, b, c, ... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre variétés à alpha = 0,05 lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

II.2.4 Compétition interspécifique des deux espèces

Le résultat de la dynamique d'émergence des individus F₁ (Figure 16) révèle une coexistence de *S. zeamais* et *P. truncatus* dans la même ressource alimentaire. Les émergences des deux espèces sont observées simultanément à partir du 7^{ième} jour de suivi. La population de *P. truncatus* atteint son pic au 17^{ième} jour, puis régresse progressivement. Celle de *S. zeamais* augmente plus lentement et n'atteint son pic qu'au 26^{ième} jour de suivi. Le résultat indique également une diminution progressive des émergences de *P. truncatus* à partir du 19^{ième} jour, coïncidant avec une augmentation brusque des émergences de *S. zeamais*. Ainsi, les résultats suggèrent qu'il existe une compétition interspécifique entre les deux espèces, particulièrement entre le 7^{ième} et le 24^{ième} jour, avant que *S. zeamais* ne devienne le principal concurrent qui surpasse *P. truncatus* à partir du 24^{ième} jour.

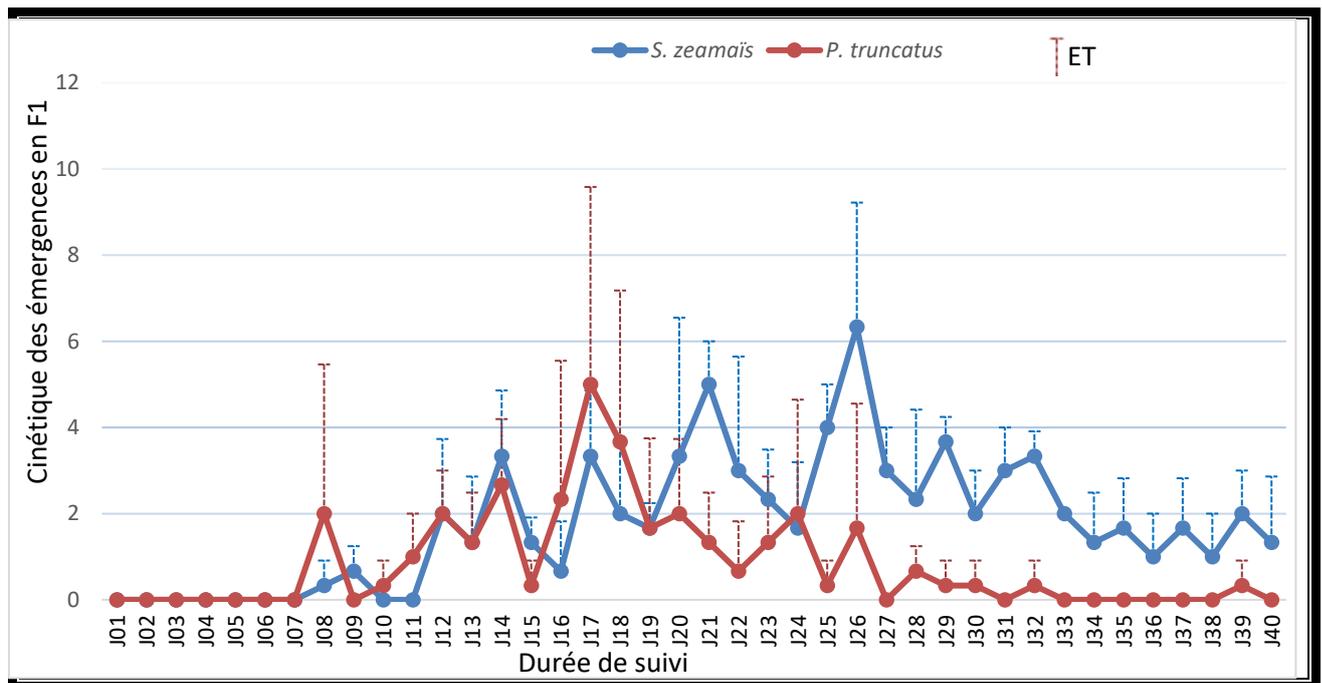


Figure 16 : Dynamique des populations des espèces sur la même ressource alimentaire

La descendance de chacune des deux espèces mises simultanément dans la même ressource alimentaire est comparée avec celle de chacune d'elle introduite isolément dans la même variété avec la même durée (Figure 17). Une différence significative ($p\text{-value} < 0,001$) est notée sur la descendance des deux espèces pour les deux tests. La population de *S. zeamais* en infestation combinée ($71,67 \pm 7,57$ adultes) est 11 fois plus élevée que celle de l'espèce isolée ($6,33 \pm 6,11$ adultes). L'émergence de *P. truncatus* qui est évaluée à $5,00 \pm 2,65$ adultes dans l'infestation isolée est multipliée par plus de 9 ($46,33 \pm 2,52$ adultes) dans l'infestation combinée avec *S. zeamais*. Les populations des deux espèces ont augmenté de façon exponentielle dans la co-infestation.

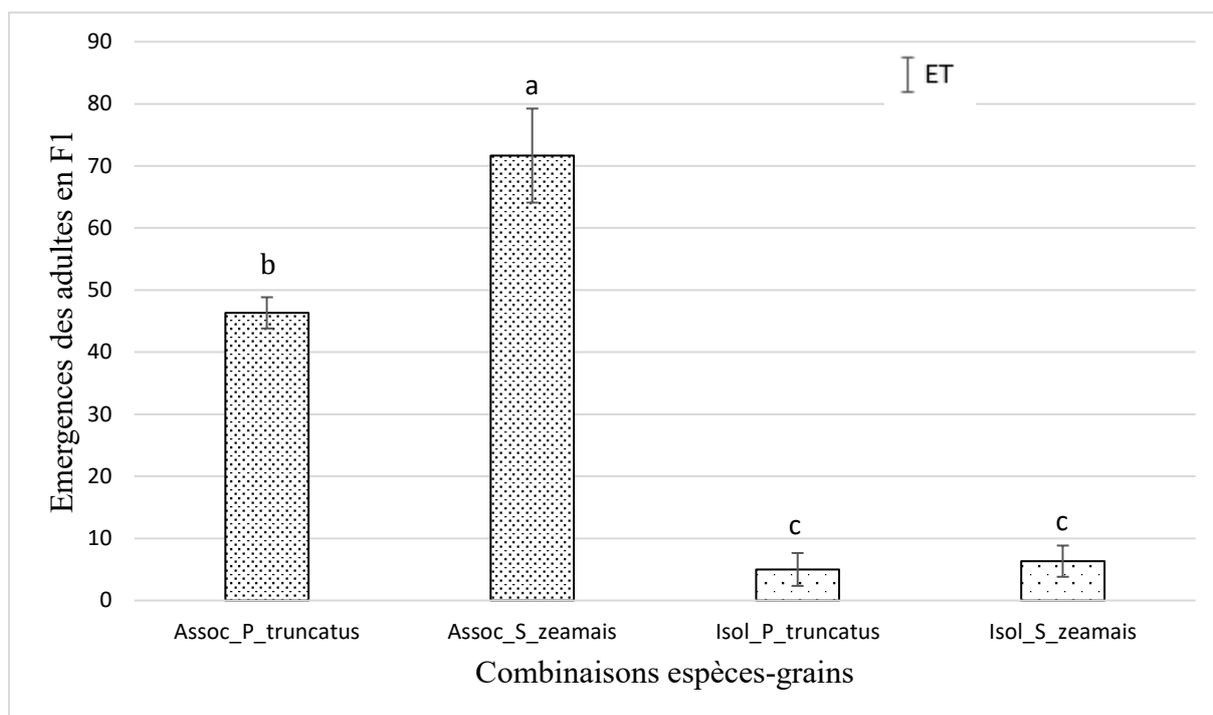


Figure 17 : Populations des espèces combinées et isolées

Assoc_P_truncatus = adultes de *P. truncatus* qui ont émergé de la co-infestation

Isol_P_truncatus = adultes de *P. truncatus* qui ont émergé de l'infestation isolée

Assoc_S_zeamais = adultes de *S. zeamais* qui ont émergé de la co-infestation

Isol_S_zeamais = adultes de *S. zeamais* qui ont émergé de l'infestation isolée

Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre types d'infestation à $\alpha = 0,05$ lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

II.2.5 Tolérance interspécifique

II.2.5.1 Sélection de grains hôtes pour l'oviposition de *S. zeamais*

Le résultat de la sélection des grains-hôtes par *S. zeamais* dans un environnement contenant à la fois des grains de maïs non infestés (grains sains) et des grains préalablement infestés par *P. truncatus* révèle une différence significative ($p\text{-value} = 0,0008$) pour la préférence d'oviposition (Figure 18). L'émergence des adultes enregistrée au niveau de chaque type de grains suggère que les femelles du charançon préfèrent déposer plus d'œufs sur des grains précédemment infestés par le grand capucin, environ 2 fois plus ($77,33 \pm 14,36$ adultes) que sur les grains non infestés ($39,33 \pm 9,29$ adultes).

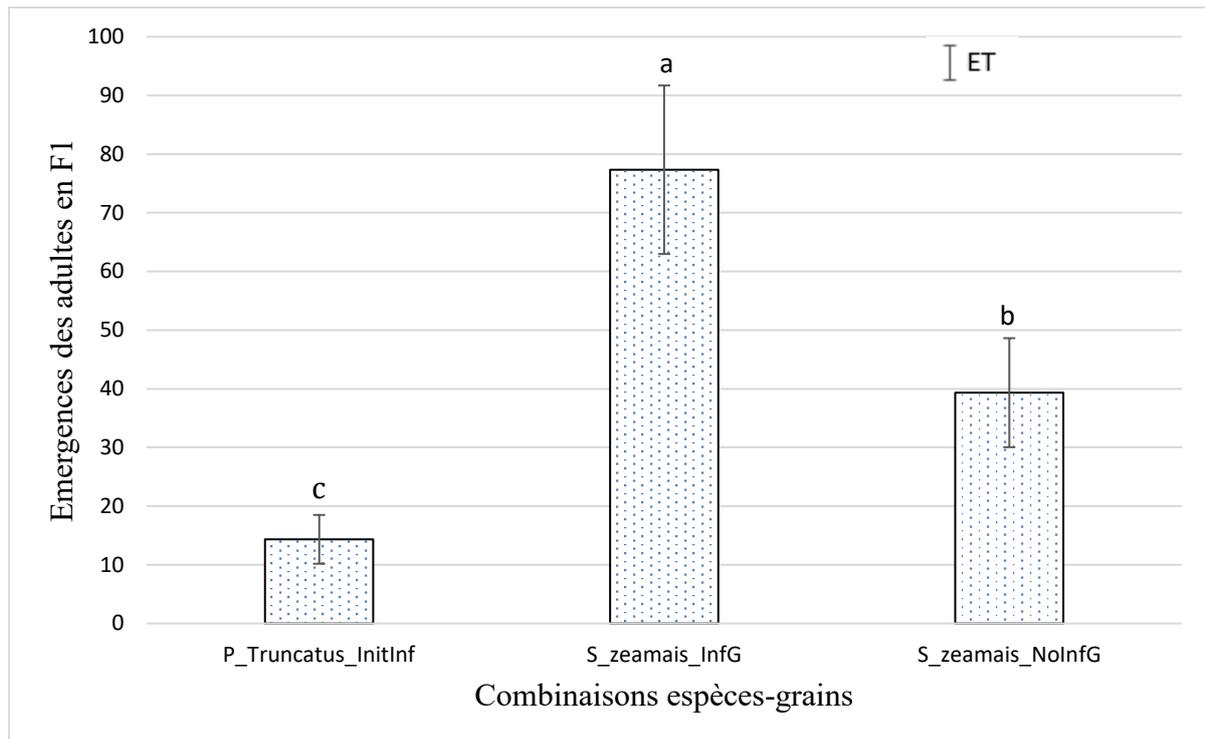


Figure 18 : Choix des grains hôtes pour l'oviposition de *S. zeamais*

P_Truncatus_InitInf= adultes de *P. truncatus* ayant émergés

S_zeamais_InfG = adultes de *S. zeamais* émergés des grains préalablement infestés par *P. truncatus*

S_zeamais_NoInfG = adultes de *S. zeamais* émergés des grains sains.

Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre types de grains à $\alpha = 0,05$ lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

II.2.5.2 Sélection de grains hôtes pour l'oviposition de *P. truncatus*

La sélection des grains hôtes par *P. truncatus* entre les grains non infestés et les grains préalablement infestés par *S. zeamais* montre une différence significative (p -value = 0,0001) sur la préférence d'hôte de ponte (Figure 19). L'émergence des insectes enregistrée dans les deux catégories de grains révèle une préférence du grand capucin pour les grains non infestés ($10,00 \pm 1,00$ adultes), et y produit 3 fois plus de descendance que pour les grains infestés au préalable par le charançon du maïs ($3,67 \pm 0,57$ adultes). Des larves de *P. truncatus* (8 larves) ont été trouvées à l'extérieur des grains préalablement infestés par *S. zeamais* au 10^{ème} jour, qui est le jour de la plus importante émergence de *S. zeamais* (16 adultes).

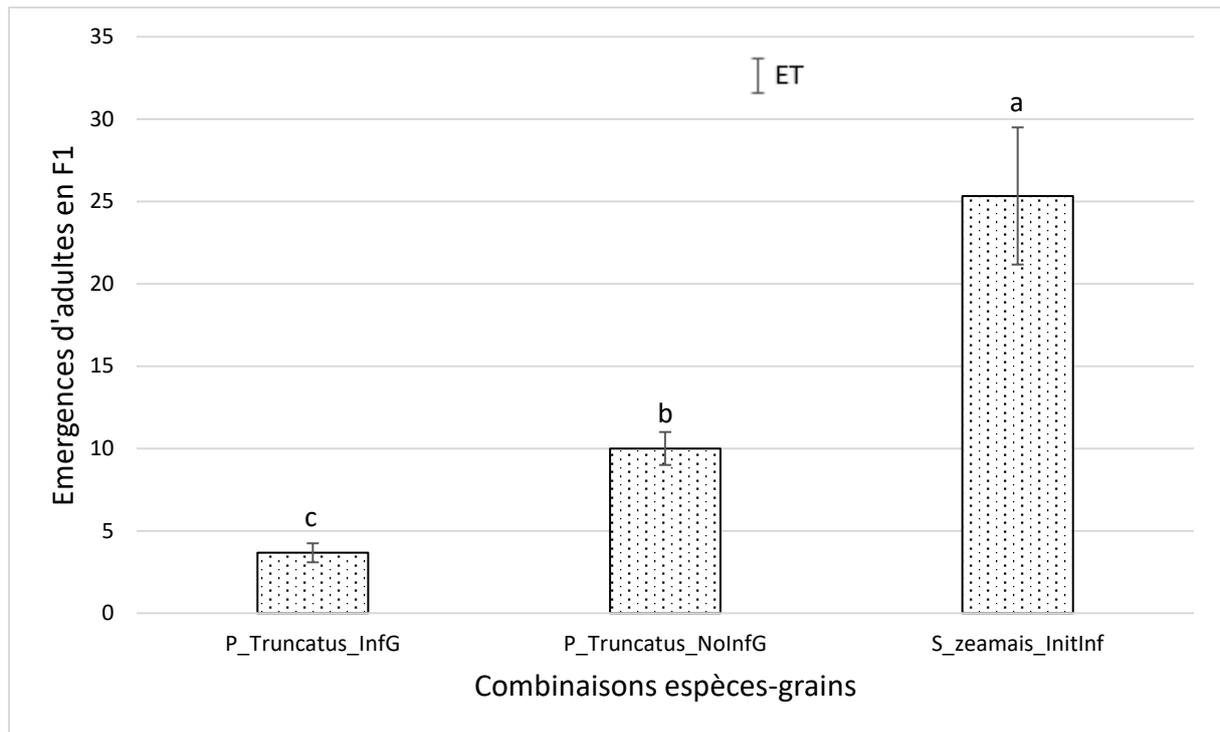


Figure 19 : Choix des grains hôtes pour l'oviposition de *P. truncatus*

P_Truncatus_InfG = adultes de *P. truncatus* émergés des grains préalablement infestés par *S. zeamaïs*

P_Truncatus_NoInfG = adultes de *P. truncatus* émergés des grains sains

S_zeamaïs_InitInf = adultes de *S. zeamaïs* ayant émergés

Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre types de grains à $\alpha = 0,05$ lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

II.3 Discussion

La sensibilité des grains de maïs exposés à des infestations artificielles de *Sitophilus zeamaïs* et de *Prostephanus truncatus* est évaluée par des paramètres de sensibilités tels que le nombre d'insectes émergés en F₁, le temps médian de développement de la descendance, les pourcentages d'attaque et de pertes pondérales des grains et l'indice de susceptibilité de Dobie (IS). Ces paramètres sont suggérés et utilisés par les travaux antérieurs comme indicateurs de niveaux de résistance des grains aux insectes post-récolte. Les résultats montrent que toutes les neuf variétés de maïs testées dans cette étude sont favorables au développement et à la reproduction des deux espèces, avec des variations significatives entre les paramètres de sensibilité selon la variété. Cependant, les performances conservées pour certains grains face à l'infestation de ces insectes indiquent que la résistance des variétés hôtes peut constituer un élément efficace pour la lutte antiparasitaire intégrée.

Sensibilité des variétés de maïs à *S. zeamais*

La forte corrélation entre l'effectif des émergences de *S. zeamais*, les niveaux d'attaques et de pertes pondérales des grains s'explique par l'unique activité alimentaire des larves. Ce résultat corrobore ceux trouvés dans la littérature (Arnason *et al.*, 1994 ; Osipitan *et al.*, 2012 ; Demissie *et al.*, 2015 ; Suleiman *et al.*, 2015). En effet, les larves de *S. zeamais* entrent en compétition intenses dans le grain dès leur émergence pour ne rester qu'une seule larve qui arrive en stade adulte (Tilman, 1980) laissant un trou au grain. Si le nombre de descendants est considéré comme l'intensité de l'infestation, il pourrait alors être suggéré que les niveaux d'attaque et de pertes pondérales dus à l'activité alimentaire des larves de *S. zeamais* correspondent à la sévérité de l'infestation. L'indice de susceptibilité de Dobie (IS) utilisé pour classer les variétés, les discrimine selon leurs niveaux de sensibilité en trois catégories que sont modérément résistante (SWAN), sensibles (Tzee-White, Tzee-Yellow, Across-Pool, DMR-ES et Early-Thaï) et hautement sensibles (Obatampa, Synth-C et Synth-9243). La variété SWAN a un niveau de résistance à *S. zeamais* 2 fois plus élevée que celle du groupe composé d'Obatampa, Synth-C et Synth-9243. Ces dernières s'avèrent être les hôtes les mieux favorables au développement de l'insecte, avec un nombre très élevé d'émergences de $69,67 \pm 8,50$ (Obatampa), $51,00 \pm 3,46$ (Synth-C) et $47,00 \pm 5,00$ (Synth-9243) d'adultes. Pour ces variétés, les pertes pondérales des grains varient de $1,87 \pm 0,44$ % (Synth-9243) à $3,36 \pm 0,87$ % (Obatampa) pour une seule génération (30 jours). Cela suggère que *S. zeamais* est un ravageur extrêmement vorace sur ces trois variétés de maïs et est capable d'en causer d'énormes pertes avec une augmentation de l'infestation et/ou de la durée de stockage. Contrairement, avec la variété SWAN, un nombre d'adultes moins important ($6,33 \pm 1,53$ adultes) et une perte pondérale minimale des grains ($0,29 \pm 0,02$ %) sont enregistrés. Dans cette variété, les taux de multiplication par femelle et d'augmentation par semaine des insectes sont moins élevés. Le résultat de ce test suggère que la variété SWAN présente un bon profil pour une conservation, et pourrait être une variété de maïs potentielle à utiliser afin de réduire les pertes après récolte dues à *S. zeamais* dans les pays tropicaux.

✚ Sensibilité des variétés de maïs à *P. truncatus*

Le résultat de la sensibilité des grains exposés à *P. truncatus* montre que le nombre d'insectes émergés est positivement lié aux pourcentages d'attaques et de pertes de poids des grains. Ce résultat confirme ceux de Meikle *et al.* (1998) et de Mwololo *et al.* (2012). Sur la base de l'IS, les variétés ont été classées en trois catégories selon leurs niveaux de sensibilité à l'infestation par le grand capucin du maïs. Un groupe composé de variétés résistantes que sont Early-Thaï, DMR-ES et Tzee-Yellow (avec l'IS le plus petit) enregistre peu d'émergences d'insectes. Dans ces variétés, la reproduction des insectes est négativement affectée et les dommages causés sont minimes. Les paramètres de sensibilité du maïs qui sont significativement très petits révèlent une capacité naturelle de ces variétés à résister contre l'infestation par *P. truncatus*. À l'inverse, Synth-9243, Synth-C et Obatampa, qualifiées de variétés susceptible (IS 3 fois plus élevés que ceux du groupe précédent), enregistrent la plus forte émergence d'insectes avec des taux de multiplication par femelle significativement plus élevés. Les niveaux d'attaques et de pertes pondérales des grains sont très élevés pour ces variétés de maïs. Le groupe des variétés modérément résistantes (SWAN, Across-Pool et Tzee-White) enregistre des valeurs moyennes en nombre d'insectes émergés et en dommages infligés aux grains. La corrélation simple du nombre d'insectes émergés avec les niveaux d'attaques et de pertes de poids des grains s'expliquerait par deux facteurs que sont l'activité alimentaire des adultes parents et le comportement reproductif de l'insecte. Les adultes de *P. truncatus* se nourrissent des grains et n'ont pas forcément les mêmes contraintes alimentaires que les larves vis-à-vis des caractéristiques du grain de maïs. Par exemple, certaines variétés modérément résistantes (Across-Pool et Tzee-White) ont subi plus de dommages que d'autres qui sont classées susceptibles (Obatampa et Synth-C). D'autre part, la femelle de *P. truncatus* dépose plusieurs œufs dans un seul grain, soit en moyenne 7,4 (Shires, 1980) à 8,4 œufs (Li, 1988). L'absence de compétition larvaire fait que l'ensemble des œufs déposés dans le grain arrive à éclore, et les larves se développent normalement pour donner plusieurs adultes à partir d'un seul grain (troué). Ces variétés hôtes (Early-Thaï, DMR-ES et Tzee-Yellow) résistantes à l'infestation de *P. truncatus* présentent un bon profil pour un stockage, et pourraient être des variétés de maïs potentielles à utiliser pour réduire les pertes de maïs après récolte dues au grand capucin dans les pays tropicaux. Cette étude montre que les variétés de maïs testées n'ont pas le même profil de sensibilité vis-à-vis des deux espèces d'insectes.

Globalement, les variétés sont plus sensibles à l'infestation de *S. zeamais* (IS variant de $6,09 \pm 0,29$ à $13,51 \pm 1,12$) qu'à celle de *P. truncatus* (IS variant de $2,88 \pm 0,23$ à $9,76 \pm 0,24$). DMR-ES, Tzee-Yellow et Early-Thaï qui sont résistantes à *P. truncatus* (IS = $3,05 \pm 0,09$; $3,75 \pm 0,30$ et $2,88 \pm 0,23$ respectivement) sont cependant sensibles à *S. zeamais* (IS = $9,39 \pm 0,41$; $9,05 \pm 0,88$ et $8,84 \pm 0,66$ respectivement). Cette situation complique le choix de variétés à double résistance pour ces deux espèces.

✚ *Pouvoir germinatif des grains attaqués*

Au-delà des pertes quantitatives susmentionnées, cette étude montre aussi des pertes qualitatives matérialisées par une forte baisse du pouvoir germinatif des grains attaqués. Les grains attaqués par *P. truncatus* ont un pouvoir germinatif largement plus faible que ceux attaqués par *S. zeamais*. Ceci est dû aux comportements reproductifs des deux espèces qui diffèrent largement. L'absence de compétition larvaire chez *P. truncatus* entraîne un développement simultané de plusieurs larves dans le même grain en le consommant quasi-totalement et rendant impossible sa germination, contrairement avec *S. zeamais* où on n'a pas de compétition larvaire (Tilman, 1980 ; Giga & Smith, 1985 ; Hawley, 1985 ; Mangel *et al.*, 1994). En effet, le germe du grain (formé de l'embryon et du cotylédon) qui assure la germination est généralement consommé par l'insecte (Dabiré *et al.*, 2008). Pour certains grains où le germe n'est pas consommé, l'endosperme et les réserves qui assurent la croissance de la jeune plantule durant les premiers jours après la germination sont fortement réduits. Ce qui fait qu'il peut y'avoir une germination, mais la jeune plantule produite accuse un retard de croissance et est faible et vulnérable aux attaques des moisissures, de bactéries et d'autres insectes.

De ce fait, une fois qu'un grain de maïs est infesté par l'une de ces espèces d'insecte, il doit être considéré inapte pour des semences.

✚ *Préférence variétale des insectes (criblage à choix libre)*

Dans cette partie, l'attractivité et la répulsion de *S. zeamais* et de *P. truncatus* des neuf variétés-hôtes de maïs ont été bien mises en évidence.

S. zeamais: les résultats indiquent que les adultes parents en explorant l'ensemble des variétés de maïs pour sélectionner une ressource alimentaire favorable au développement de leurs progénitures, étaient plus fréquents sur les variétés DMR-ES, Synth-9243 et Early-Thaï. L'abondance des parents adultes de *S. zeamais* sur ces variétés suggère qu'elles auraient plus d'effets attractifs sur l'insecte que les autres variétés.

Par contre, les adultes parents étaient moins fréquents sur les variétés SWAN et Tzee-Yellow. Ces variétés semblent avoir plus d'effets répulsifs sur l'insecte que les autres. Cependant, la non-significativité de l'occurrence des adultes de *S. zeamais* pourrait être expliquée par leur facilité de déplacement, qui fait qu'ils peuvent se retrouver sur une variété par le hasard. La descendance F₁ de ce charançon révèle une influence significative du facteur variété sur la ponte des femelles. Le résultat montre que le nombre d'individus émergés de la variété Synth-9243 est largement supérieur à celui de toutes les autres variétés. Ceci suggère que, dans un environnement contenant ces neuf variétés de maïs, le charançon semble pondre majoritairement ses œufs sur Synth-9243. Ainsi, la variété Synth-9243 se révèle ici comme la ressource alimentaire la plus attractive et la plus favorable au développement de *S. zeamais*. Par conséquent, les niveaux d'attaques ($10,52 \pm 2,28$ %) et de pertes de poids ($2,28 \pm 0,57$ %) des grains résultant des activités alimentaires des larves sont plus élevés dans cette variété. D'ailleurs, l'étude indique une forte corrélation positive du nombre d'adultes émergés avec les attaques et les pertes de poids des grains, corroborant les résultats de Demissie *et al.* (2015) et de Suleiman *et al.* (2015). Le haut potentiel de reproduction noté de cet insecte vorace entraînerait des pertes économiquement significatives sur cette variété de maïs en stock. La variété DMR-ES, vient en deuxième position avec une descendance de $7,67 \pm 2,43$ insectes qui infligent $4,07 \pm 1,86$ % d'attaque et $0,95 \pm 0,19$ % de pertes pondérales aux grains. Cela suggère que cet insecte est capable de causer des dommages importants à cette variété de maïs en stock lorsqu'elle est laissée sans protection. Inversement, les plus petites émergences d'insectes, d'attaques et de pertes pondérales de grains sont enregistrées chez les variétés Across-Pool, Tzee-Yellow et SWAN. Cela indique qu'elles auraient des propriétés répulsives pour la ponte et les activités alimentaires de cet insecte.

P. truncatus : les résultats montrent bien que les parents adultes soient présents sur toutes les variétés de maïs pour explorer les ressources alimentaires de ponte, ils étaient plus fréquents sur la variété Synth-C. Cette abondance suggère une préférence de l'insecte pour cette variété qui semble avoir plus d'effets attractifs sur les adultes de *P. truncatus*. En revanche, les adultes parents étaient moins abondants sur la variété SWAN. Ainsi, cette variété semble avoir plus d'effets répulsifs sur l'insecte que les autres variétés. La significativité de la différence d'occurrence de *P. truncatus* entre les variétés serait due à sa faible capacité de mobilité, qui fait que son déplacement vers une ressource alimentaire soit influencé par l'attractivité de celle-ci et non par le hasard.

La descendance du grand capucin révèle une influence significative du facteur variété sur la ponte des femelles. En effet, l'étude montre que seulement 4 variétés (Synth-C, Early-Thaï, Synth-9243 et DMR-ES) parmi les neuf testées ont enregistré des émergences d'individus. Ces variétés seraient soit les seules sélectionnées lors de la ponte des parents, soit les seules favorables au développement larvaire de l'insecte. Cependant, l'infestation sans choix des variétés de ce travail avait enregistré une émergence d'adultes de *P. truncatus* dans les autres variétés de maïs (Across-Pool, Obatampa, SWAN, Tzee-White et Tzee-Yellow). Par conséquent, l'absence de descendance de *P. truncatus* dans ces variétés de maïs serait due à leur non sélection pour hôtes d'oviposition. La variété Synth-C, sur laquelle les parents adultes étaient plus abondants en période de ponte, enregistre le plus grand nombre d'émergences d'insectes. Ceci suggère que, dans un environnement contenant ces neuf variétés de maïs, le grand capucin semble regrouper majoritairement ses œufs sur la variété Synth-C. Cette variété se révèle ici comme la ressource alimentaire la plus attractive et la plus favorable au développement de *P. truncatus*. Par conséquent, les attaques et les pertes de poids des grains, résultant des activités alimentaires des larves, sont plus élevées chez cette variété. En effet, la présente étude indique que le nombre d'adultes émergés est positivement corrélé aux attaques et aux pertes de poids des grains, ce qui avait été rapporté par des travaux antérieurs (Meikle *et al.*, 1998 ; Mwololo *et al.*, 2012). Compte tenu du fort potentiel de reproduction de cet insecte vorace, son infestation entraînerait des pertes significatives sur cette variété de maïs en stockage sans protection. Early-Thaï, la variété la plus infestée après Synth-C, enregistre une progéniture d'insecte 2 fois supérieure au nombre d'individus obtenus dans les variétés Synth-9243 et DMR-ES. Les variétés Across-Pool, Obatampa, SWAN, Tzee-White et Tzee-Yellow, qui ne présentent aucune émergence d'insectes, n'ont enregistré donc aucune attaque ou perte pondérale de grains. Elles auraient en effet des propriétés répulsives pour la ponte et les activités alimentaires de l'insecte.

Compétitions interspécifiques des deux espèces

Sitophilus zeamais et *Prostephanus truncatus* mélangés dans la même ressource alimentaire entrent en compétition intense en augmentant simultanément leurs pontes et par conséquent leurs descendance. En effet, l'émergence des deux espèces a augmenté de façon exponentielle dans l'infestation combinée avec un nombre d'individus 9 fois plus élevé que ceux des infestations isolées.

Cette augmentation significative des populations suite à la compétition interspécifique contribuerait fortement à la hausse des attaques et des pertes de poids des grains. Makundi *et al.* (2010) avaient enregistré plus d'attaques et de pertes sur les grains de maïs mélangés avec ces espèces que quand elles sont isolées. En effet, cette capacité des espèces à augmenter leur potentiel de reproduction et leur voracité larvaire en co-infestation entraîneraient probablement des pertes élevées sur le maïs stocké. Bien que les espèces aient simultanément accru leurs taux de reproduction, le nombre de leurs progénitures était différent. Dans l'ensemble, les émergences des individus de *S. zeamaïs* étaient plus abondantes et surmontaient celles de *P. truncatus* à partir du 24^{ième} jour. Une expérimentation semblable effectuée par Makundi *et al.* (2010) pendant six (6) mois avait montré une forte dominance des populations de *S. zeamaïs* sur celles de *P. truncatus*. Cette prédominance de *S. zeamaïs* serait due à une inhibition du développement pré-imaginal de *P. truncatus*, qui réduirait par conséquent ses émergences. Des études antérieures sur la compétition de ces deux espèces avaient désigné *S. zeamaïs* comme meilleur concurrent sur *P. truncatus* (Cowley *et al.*, 1980 ; Haubruge & Verstraeten, 1987; Giga & Canhao, 1993). Ces auteurs ont indiqué que la présence de *S. zeamaïs* perturbait le développement de *P. truncatus* et ont mentionné un effet suppressif de *S. zeamaïs* sur *P. truncatus*. Pour *S. zeamaïs*, une seule larve se développera jusqu'à l'âge adulte et émergera d'un grain (compétition larvaire intraspécifique) dans les cas où plus d'un œuf est pondue dans un grain (Richards, 1947 ; Longstaff, 1981 ; Guedes *et al.*, 2010), contrairement à *P. truncatus* où plusieurs individus peuvent émerger d'un seul grain (pas de compétition larvaire intraspécifique). Cette capacité compétitive des larves de *S. zeamaïs* leur donne les compétences nécessaires pour attaquer et réduire les larves de *P. truncatus* qui ne sont pas habituées à une compétition larvaire. En effet, Sharifi et Mills (1971) avaient mentionné que, lorsque deux larves se rencontrent dans un tunnel d'un grain, la larve la plus compétente tue généralement la larve la plus vulnérable. En résumé, cette étude confirme qu'il existe effectivement une véritable compétition interspécifique entre *S. zeamaïs* et *P. truncatus* et permet de prédire que *S. zeamaïs* est le principal concurrent et constituerait l'espèce dominante à long terme.

Tolérance interspécifique

Le test de sélection de grains hôtes par *S. zeamais* et *P. truncatus* pour déterminer leur préférence dans un environnement contenant une combinaison de grains sains et grains préalablement infestés révèle des comportements reproductifs différents des espèces. Les résultats montrent que l'oviposition de *P. truncatus* est significativement plus attirée par les grains non infestés que par les grains préalablement infestés par *S. zeamais*. Contrairement, la préférence d'hôtes de ponte de *S. zeamais* est significativement plus attirée par les grains déjà infestés par *P. truncatus* que par les grains non infestés. Les grains infestés par le charançon du maïs semblent avoir un effet dissuasif sur le grand capucin. Ce comportement reproductif de l'insecte serait dû à une répulsion provoquée par les activités alimentaires des larves ou par des substances dissuasives déposées sur le maïs par les adultes du charançon. En utilisant la même approche expérimentale, Danho et al. (2000) ont indiqué que les grains non infestés étaient plus préférés et plus endommagés par *P. truncatus* que les grains infestés trois ou quatre semaines auparavant par *S. zeamais*. Egalement, les travaux de Haubruge et Verstraeten (1987) ont montré que *P. truncatus* était capable de reconnaître les grains infestés par *S. zeamais* et ne pondait pas ou peu d'œufs sur ces grains. Donc, les observations de ces auteurs ainsi que la performance supérieure de *S. zeamais* enregistrée précédemment dans ce travail (compétition interspécifique) relierait directement l'effet dissuasif de la ponte de *P. truncatus* à la haute capacité concurrentielle des larves de *S. zeamais* présentes dans le grain. La préférence de ponte de *S. zeamais* sur des grains préalablement infestés par *P. truncatus* serait stimulée soit par une substance déposée sur les grains infestés, soit par les vibrations larvaires de *P. truncatus* (larves pourvues de 3 paires de pattes). En fait, Adams et al. (1953) disaient que *S. zeamais* peut détecter le bruit émis par les larves de *P. truncatus* lors de leurs déplacements ou de leurs activités d'alimentation dans le grain. Ces vibrations larvaires constitueraient un indicateur qui guide la préférence de ponte de *S. zeamais* vers les grains déjà infestés.

En résumé, ces études au laboratoire montrent des interactions significatives entre *S. zeamais* et *P. truncatus* et peuvent fournir des informations sur les types d'interactions et la régulation des populations dans la nature à long terme.

CONCLUSION PARTIELLE

En résumé, l'étude permet d'identifier des variétés qui ont de bons profils de résistance capables de maintenir les pertes associées à ces insectes à des degrés économiquement acceptables. Les résultats de l'infestation sans choix indiquent que toutes les variétés évaluées peuvent servir de support alimentaire à ces insectes, et globalement, les variétés sont plus sensibles à l'infestation de *S. zeamais* qu'à celle de *P. truncatus*. La résistance contre *P. truncatus* de certaines variétés (DMR-ES, Tzee-Yellow et Early-Thaï) qui se révèlent susceptibles à l'infestation de *S. zeamais* complique le choix de variétés à double résistance pour ces deux espèces. Cependant, le potentiel de reproduction et la voracité de chacune des deux insectes se révèlent significativement différents entre les variétés. Ainsi, des variétés intéressantes pour la résistance du maïs à ces espèces sont identifiées parmi les neuf variétés de maïs sélectionnées pour les agriculteurs. La variété la plus résistante contre *S. zeamais* est SWAN, avec un potentiel de reproduction de l'espèce significativement plus petit. Concernant *P. truncatus*, les variétés les plus résistantes sont Early-Thaï, DMR-ES et Tzee-Yellow. Ces variétés constituent les hôtes les moins favorables pour le grand capucin, avec des capacités reproductives de l'insecte significativement faibles. Les variétés Obatampa, Synth-C et Synth-9243, les plus sensibles pour les deux espèces, présentent un risque très élevé de pertes économiques du maïs dans les stocks. A la lumière de ces analyses, ce travail suggère l'usage des variétés Early-Thaï, Tzee-Yellow et DMR-ES dans les zones peuplées majoritairement par *P. truncatus* et SWAN dans les zones où il y'a plus de *S. zamaïs* afin de réduire les pertes post-récolte de maïs dues à ces insectes. Tenant compte des résultats des tests d'infestation sans choix et à choix libre, la variété SWAN représente la variété la plus répulsive et la moins favorable à la multiplication des populations de *S. zeamais* parmi les neuf variétés. Elle a alors le meilleur profil entomologique et pourrait être une potentielle variété à utiliser afin de réduire les pertes post-récolte du maïs dues à *S. zeamais* au Sénégal et peut être dans les pays tropicaux. Pour *P. truncatus*, parmi les trois variétés résistantes lors du test d'infestation sans choix (Early-Thaï, DMR-ES et Tzee-Yellow), seule la variété Tzee-Yellow n'a enregistré aucune émergence pour le test à choix libre. Ces résultats suggèrent que Tzee-Yellow est à la fois une variété répulsive vis-à-vis de *P. truncatus* et défavorable à la multiplication de l'insecte. Elle serait alors une potentielle variété à utiliser pour réduire les pertes post-récolte infligées au maïs par *P. truncatus*.

Pour la compétition, *S. zeamais* doit être considéré comme un concurrent supérieur et *P. truncatus* comme un concurrent inférieur dans le même écosystème de produits stockés. Cette étude a également conclu que les grains infestés par le charançon ont un effet dissuasif sur la sélection de grains hôtes par *P. truncatus*, alors que les pontes de *S. zeamais* sont largement plus attirées par les grains déjà infestés par *P. truncatus* que par les grains sains. Cependant, l'intérêt de *S. zeamais* pour les grains préalablement infestés par *P. truncatus* mérite une étude plus approfondie. Ce travail conclut également que le pouvoir germinatif des grains infestés par ces insectes est tellement affecté que les grains attaqués doivent être considérés inaptes pour des semences. Les performances des insectes et les pertes enregistrées sur les grains stockés sont souvent liées à des facteurs comme les conditions du milieu de stockage et surtout les caractéristiques morphologique, physique et biochimique du grain.

**CHAPITRE III : CARACTERISTIQUES MORPHO-PHYSIQUES ET BIOCHIMIQUES
DES GRAINS DES DIFFERENTES VARIÉTÉS DE MAÏS**

INTRODUCTION

Les plantes contiennent des molécules qui peuvent jouer plusieurs rôles, aussi bien chez la plante elle-même, chez les ravageurs que chez l'espèce humaine. Certaines espèces végétales contiennent des molécules toxiques, qui représentent par ailleurs un véritable danger pour les humains (nicotine par exemple). D'autres espèces végétales, en particulier les céréales, ont des grains constitués principalement de glucides, de protéines, de lipides, d'eau, de minéraux, de vitamines, des phytates, des polyphénols,... (Morand-Fehr & Tran, 2001 ; Adom *et al.*, 2003 ; Arranz & Calixto, 2010), très importants dans l'alimentation humaine et animale. Dans la nature, il y'a peu de plantes cultivées qui présentent autant de variabilité que les grains de maïs en matière de dimension, de structuration, de coloris, de nutriments et de composition chimique. C'est une espèce cultivée très importante qui possède des molécules chimiques capables d'intervenir dans la morphologie et la structuration du grain, mais aussi dans la répulsion et la limitation des dommages d'organismes destructeurs. Le grain de maïs est composé d'amidon, de protéines, de matière grasse, de fibres alimentaires, de polyphénols, de sels minéraux, de vitamines liposolubles et hydrosolubles, *etc.* (Earle *et al.*, 1946 ; Gutiérrez-uribe *et al.*, 2010 ; Hidalgo *et al.*, 2011 ; Deffan *et al.*, 2015 ; Semassa *et al.*, 2016). Les polyphénols (ou acides phénoliques) du maïs sont constitués essentiellement de l'acide férulique (Manach *et al.*, 2004) et de faibles quantités d'acides sinapique et para-coumarique (Gallardo *et al.*, 2006). D'autres classes de polyphénols sont présentes dans les grains de maïs tels que les flavonoïdes et les lignanes. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux polyphénols totaux et aux acides phénoliques cités dans le mécanisme de résistance des grains de maïs, comme les hydroxycinnamiques (acides férulique et p-coumarique). Les aspects physiques et biochimiques de la dureté des grains de maïs ont été décrits dans de nombreuses publications (Peters *et al.*, 1972 ; Yadu *et al.*, 2000 ; García-Lara *et al.*, 2004 ; Abebe *et al.*, 2009 ; Fourar-Belaifa & Fleurat-Lessard, 2015). Certains auteurs associent la dureté du maïs à une contribution biochimique de certains constituants tels que les protéines (famille des zéïnes), l'amidon et les acides phénoliques (acides féruliques liés au péricarpe). D'un autre côté, certaines études ont mentionné une absence de lien entre la teneur en protéines du grain et la dureté. L'évaluation des différents paramètres (morpho-physique et chimique) du grain qui interviennent sur la sensibilité du maïs aux Coléoptères s'avère nécessaire pour avoir une

idée nette sur la question et développer des stratégies efficaces de lutte contre les déprédateurs.

Nous examinerons dans ce chapitre les caractéristiques morphologiques et physiques des grains ainsi que la nature et les proportions des molécules biochimiques impliquées dans le mécanisme de la résistance aux insectes.

Ce chapitre a deux objectifs spécifiques :

- **OS1** : Déterminer les caractéristiques morpho-physiques des grains des différentes variétés de maïs ;
- **OS2** : Evaluer les composés biochimiques des grains des différentes variétés de maïs.

III.1 Matériel et méthodes

Ce chapitre est constitué de résultats de plusieurs analyses réalisées au sein du Laboratoire de Chimie des molécules naturelles (Département de Chimie et Bio-industries) et de TERRA Teaching and Research Center de la Faculté agronome Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège / Belgique). Les paramètres morpho-physiques tels que la taille, la densité, la dureté et les caractéristiques de couleur des grains, ainsi que les paramètres biochimiques comme les teneurs en eau, en protéines, en matière grasse, en acide gras, en polyphénols, en acides férulique et p-coumarique, en amidon et en amylose des farines de maïs ont été déterminés selon des méthodes normalisées (AFNOR, 1982 ; AOAC, 1990 ; AOAC, 2002).

III.1.1 Caractérisation morpho-physique des grains

Le grain de maïs présente d'énorme variabilité sur le plan morpho-physique comme la taille, le poids, la densité, la couleur et la dureté qui influencent fortement la préférence et l'acceptabilité alimentaire et ovipositionnelle de l'insecte (Watson, 1987 ; Hansson & Stensmyr, 2011 ; Arnold *et al.*, 2015 ; De Groot *et al.*, 2017 ; López-Castillo *et al.*, 2018). Chez les humains comme chez les insectes, ces paramètres orientent la préférence du consommateur. Les paramètres morpho-physiques ont été évalués à partir des grains entiers, choisis aléatoirement dans les échantillons des variétés de maïs.

III.1.1.1 Mesures de la taille et du volume des grains

La taille moyenne des grains a été déterminée en mesurant les longueurs (Figure 20 *L*), les largeurs (Figure 20 *l*) et les épaisseurs (Figure 20 *e*) de 30 grains à l'aide d'un pied-à-coulisse à affichage numérique (Mitutoyo, Corporation, Japon) avec une précision de 0,05 mm.

A partir de ces données, le volume (V) du grain a été calculé en considérant sa morphologie ellipsoïdale avec la formule : $v = \frac{4\pi}{3} (L * l * e)$

Avec ces volumes individuels, le volume moyen des grains pour une variété de maïs a été calculé avec 30 grains prélevés aléatoirement sur l'échantillon de la variété.



Figure 20 : Mesures des paramètres de taille des grains de maïs.

III.1.1.2 Mesure du poids des grains

Le poids individuel des grains a été déterminé par pesage avec une balance à chambre de protection (*EXACTA*) de haute précision ($\pm 0,0001g$). Après la mesure de paramètres de taille (longueur, largeur et épaisseur), le grain est immédiatement pesé et les valeurs ont été enregistrées individuellement. Le poids moyen pour les grains d'une variété a été calculé sur la base des poids individuels des 30 grains prélevés précédemment.

III.1.1.3 Calcul de la densité des grains

Les densités individuelles des 30 grains ont été calculées en utilisant la masse et le volume de chacun des grains (Fox & Manley, 2009) selon la formule : $d = \frac{m}{v}$.

Ensuite, la densité moyenne des grains d'une variété a été calculée avec les densités individuelles des 30 grains prélevés précédemment.

III.1.1.4 Caractérisation de la couleur des grains (CIE $L^*a^*b^*$)

La couleur, définie comme étant un attribut perceptif, subjectif, élaboré dans notre système visuel à partir de la lumière renvoyée par les objets et par leur environnement (C.I.E., 1976) a été mesurée dans l'espace chromatique $L^*a^*b^*$. Ce dernier, défini par la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E., 1976) est un espace à trois dimensions uniformes du point de vue des écarts chromatiques. Ces paramètres de chromaticité ($L^*a^*b^*$) sont des attributs de la sensation visuelle qui permettent de définir des couleurs comme le bleu, le rouge, le vert, etc.

La couleur des grains a été déterminée à un haut niveau de précision, à l'aide d'un spectrophotomètre (Figure 21) de HunterLab (Miniscan XE Restor VA 3.5, ColorFlex EZ®), calibrée avec une plaque blanche standard de référence (ISO, 9001 ; 2014).

La mesure a été effectuée sur des grains entiers disposés dans une cupule à fond blanc et opaque, de diamètre correspondant à la tête de lecture du spectrophotomètre. Les grains couvrent tout le volume de la cupule et sont placés en contact direct de la tête de mesure du spectrophotomètre de façon à réduire l'influence des lumières parasites sur les paramètres mesurés. Le spectrophotomètre, couplé à un ordinateur, mesure la couleur réfléchie à partir des grains avec un éclairage directionnel annulaire 45°/0°, affiche les données spectrales et les tracés spectraux à une gamme spectrale de 400 nm - 700 nm. Les mesures ont été réalisées en six répétitions pour chaque variété et ont été exprimées dans l'espace chromatique L*a*b* ou l'espace de couleur L*a*b* (McLaren, 1976). De ces valeurs enregistrées par l'ordinateur, ont été extrapolées les valeurs relatives à l'intensité des couleurs (ΔE), au chroma (ΔC) et à l'angle de teinte ou coordonnées cylindriques de teinte (H) selon les formules suivantes :

$$\Delta E = ((L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2)^{0.5} \quad \Delta C = (a^*)^2 + (b^*)^2)^{0.5} \quad H = \tan^{-1} \left(\frac{a^*}{b^*} \right)$$

Le ΔE représente la variation totale de la couleur par rapport à une référence de surface blanche (Pineli *et al.*, 2015). L'angle de teinte (H) est l'angle d'un point calculé à partir des coordonnées a^* et b^* de l'espace colorimétrique et le chroma est la composante quantitative de la couleur (Kane *et al.*, 2003), qui reflète la pureté de la couleur dans l'espace CIE L*a*b*. Les valeurs de L^* indique la luminosité ou la clarté du grain (0 à 100 représentant de sombre à clair), de a^* donne le degré de couleur rouge à verte (+ a^* = plus de rouge, - a^* = plus de vert) et de b^* indique le degré de couleur jaune à bleu, (+ b^* = plus de jaune, - b^* = plus de bleu) (Guiné & Barroca, 2014). La clarté (L^*) dérive de la luminance de la surface du grain et les deux paramètres a^* et b^* expriment l'écart de la couleur par rapport à celle d'une surface grise de même clarté.

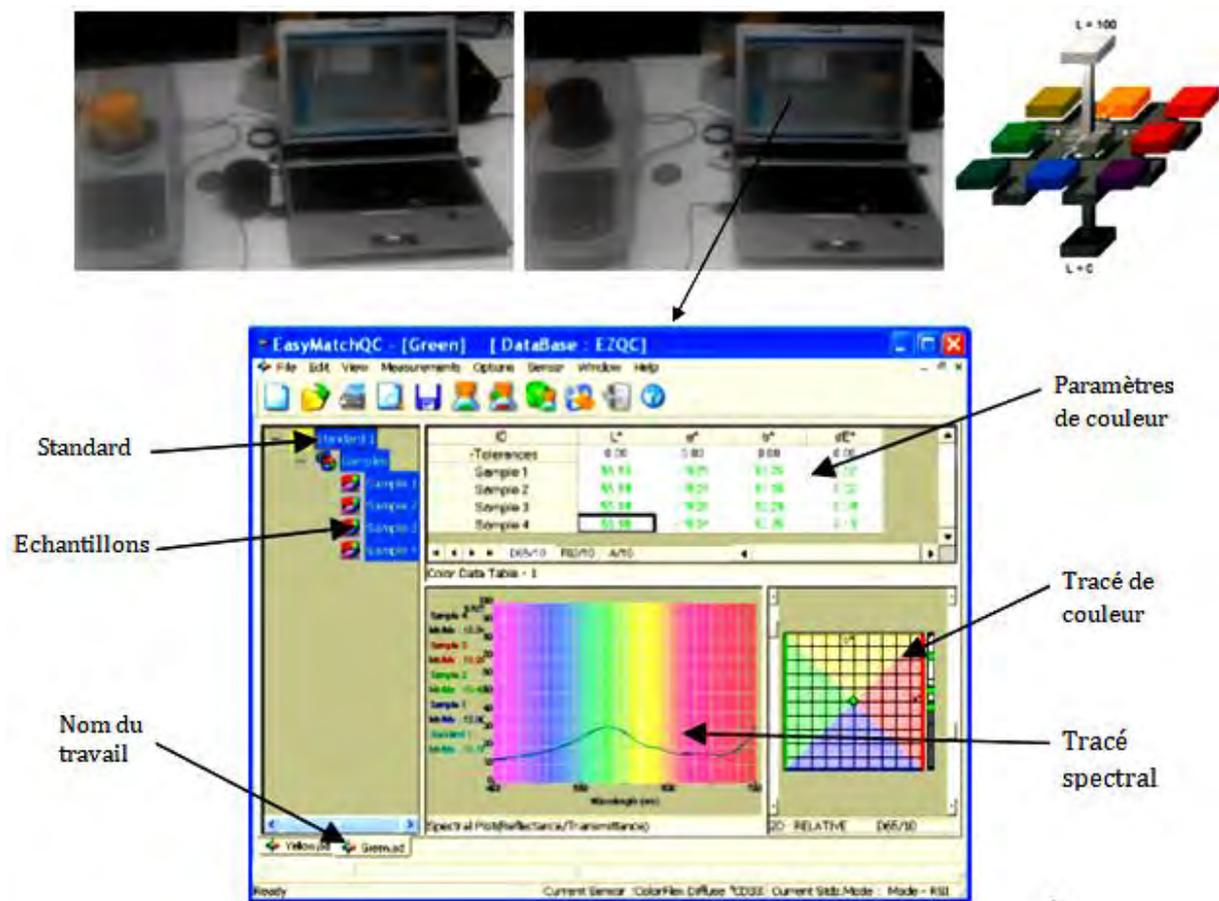


Figure 21 : Spectrocolorimètre de détermination des couleurs des grains

III.1.1.5 Evaluation de la dureté des grains

Malgré le nombre élevé d'études publiées sur la dureté des grains, il n'existe toujours pas de norme unanimement désignée pour l'évaluation de la dureté du grain de maïs. Une des méthodes les plus utilisées pour évaluer la dureté des grains de maïs est le broyage des grains entiers pour enregistrer l'énergie et le temps de broyage (Blandino *et al.*, 2010). En effet, la dureté des grains qui est contrôlée par des facteurs génétiques et environnementaux, conditionne l'énergie requise au fractionnement, mais aussi la durée que prend le broyage pour les transformer en farine.

Dans ce travail, la dureté des grains a été évaluée avec le testeur de dureté Stenvert (Culatti) (Figure 22a) sur la base de la méthode décrite par Pomeranz *et al.* (1986) et reprise par Blandino *et al.* (2010). Au préalable, les échantillons de grains ont été équilibrés avec un dessiccateur placé dans une chambre à température constante (25 ± 1 °C) pendant 48 heures afin que la différence en teneurs d'eau des variétés ne puisse influencer le résultat.

Une prise d'essai de 25 g de grains a été broyée à l'aide d'un moulin à micro-marteaux Culatti (Labtech Essa, Belmont, Australie) munit d'un écran de particules de 2 mm d'ouverture (Figure 22b). C'est un moulin qui tourne à une vitesse de 2500 tr / min à vide. La durée écoulée pour broyer 20 g de farine à partir de chaque prise d'essai de 25 g de grains (Figure 22c) a été enregistrée par un chronomètre, à trois répétitions pour chaque variété de maïs. Cette durée, considérée comme meilleur descripteur de la dureté des grains de maïs que l'énergie de broyage (Blandino *et al.*, 2010), a été utilisée pour déterminer la dureté des grains.

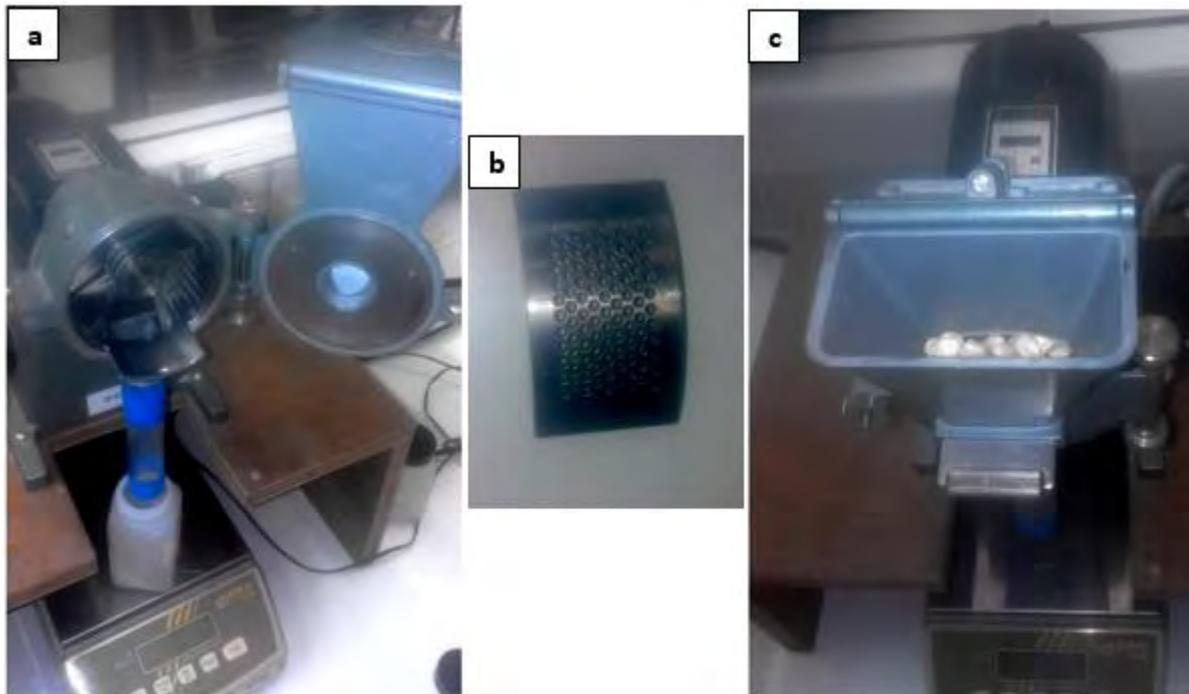


Figure 22 : Moulin à micro-marteau (Culatti) évaluant la dureté des grains

III.1.2 Caractérisation biochimique des grains

Le grain de maïs possède des composés chimiques tels que l'eau, les polyphénols, les matières grasses, les protéines, l'amidon, l'amylose, les acides gras, les acide féruliques et p-coumariques qui jouent un rôle primordiale dans la répulsion, la limitation ou l'attraction des organismes nuisibles (Gutiérrez-uribe *et al.*, 2010 ; Hidalgo *et al.*, 2011 ; Deffan *et al.*, 2015 ; Semassa *et al.*, 2016). Pour évaluer ces constituants biochimiques, les grains ont été broyés à l'aide d'un broyeur de laboratoire (M20 IKA IMLAB) jusqu'à l'obtention d'une mouture fine et homogène. Les matières sèches des échantillons ont été déterminées par dessiccation à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures.

Les paramètres biochimiques ont été exprimés par rapport à la matière sèche. Chaque analyse a été réalisée en triple au minimum.

III.1.2.1 Evaluation de la teneur en eau des gains (H.R)

L'humidité des grains de maïs a été déterminée selon la norme standard de « Association of Official Analytical Chemists Washington, DC, USA632 » (méthode 967.03 ; AOAC, 1990). Elle a été mesurée par dessiccation des échantillons de farine dans une étuve ventilée (Binder, 1505, Amilabo, France) jusqu'au poids constant. Environ 50 g de grains pour chaque échantillon de variété ont été broyés à l'aide d'un broyeur de laboratoire (M20 IKA IMLAB). Ensuite 5,0 g de cette mouture, répété trois fois pour chaque variété, ont été placés dans des conserves à aluminium tarées au préalable. L'ensemble est introduit dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures. Après cette durée de séchage dans l'étude, les échantillons ont été refroidis dans un dessiccateur, puis pesés. La teneur en eau (H.R.) est exprimée par rapport à la base humide en (%).
$$H. R. = \frac{mi - ms}{mi} \times 100$$

avec mi = masse initiale de l'échantillon ms = masse après dessiccation

III.1.2.2 Evaluation des polyphénols

III.1.2.2.1 Dosage des polyphénols totaux

Pour extraire les acides phénoliques de la matière végétale, désignés fréquemment par le terme «polyphénols», plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature selon la matrice végétale (fruits, graines, feuilles ou tige), la complexité de sa composition, ainsi que la sensibilité des acides phénoliques à l'hydrolyse et à l'oxydation (Stalikas, 2007). Parmi les méthodes, il existe l'extraction conventionnelle par solvant (Manthey & Grohmann, 1996 ; Anagnostopoulou *et al.*, 2006), l'extraction par eau chaude (Xu *et al.*, 2008), l'extraction assistée par enzymes (Li *et al.*, 2006), l'extraction par fluide supercritique (Giannuzzo *et al.*, 2003) , *etc.* Concernant le maïs, l'hydrolyse alcaline a été appliquée sur le son (Tilay *et al.*, 2008 ; Wang *et al.*, 2013) et la tige (Culhaoglu *et al.*, 2011). Chiremba *et al.* (2012) ont dosé les acides phénoliques du son de maïs par extraction assistée à micro-ondes. Bauer *et al.* (2012) ont obtenu de meilleurs rendements en acides phénoliques (acides férulique et para-couramique) sur la farine de maïs avec la méthode d'extraction par sonication.

L'extraction des acides phénoliques suscite aussi la question du bon choix de solvant, qui est diversement apprécié par les travaux antérieurs. Zia-ur-Rehman (2006) avait enregistré un meilleur rendement avec le méthanol, devant l'acétone, l'éther de diéthyte et l'éthanol. Li *et al.* (2006) ont obtenu de rendements similaires entre le méthanol et l'éthanol. Cheigh *et al.* (2012) avaient plus de polyphénols avec l'éthanol, suivi du méthanol et l'eau chaude. Bourgou *et al.* (2016) classent le méthanol pur devant l'éthanol et l'acétone purs suivant l'ordre d'efficacité en rendement d'extraction des polyphénols. La plupart des auteurs révèle que le méthanol donne le rendement le plus élevé, mais il est souvent remplacé par d'autres solvants organiques non toxiques, ayant des rendements d'extraction satisfaisants, tels que l'éthanol ou l'éther de pétrole (Bartnick *et al.*, 2006), surtout pour des applications en routines dans l'industrie.

A la lumière de ces différents travaux de recherche, nous avons choisi la méthode sonication avec du méthanol pur comme solvant pour extraire les acides phénoliques de la farine de nos échantillons de maïs.

Extraction des polyphénols

L'extraction a été faite sur 1 g de farine avec 10 ml de méthanol pur. Le mélange est agité par vortex pendant 1 min, puis les polyphénols sont extraits dans un bain à ultrason pendant 15 min (Figure 23 a). L'extrait est ensuite filtré avec du papier filtre sans cendre (Wattman N°4) puis conservé à 4°C.

Mesure des polyphénols

Le dosage des polyphénols totaux des extraits a été effectué par spectrophotométrie, selon la méthode colorimétrique utilisant le réactif de Folin-Ciocalteu décrite par Singleton et Rossi (1965). Le protocole utilisé est basé sur celui décrit par Bourgou *et al.* (2016). C'est une méthode qui est basée sur une réaction de réduction par les polyphénols d'une solution jaune de complexes polymériques ioniques formés à partir d'acides phosphotungstiques et phosphomolybdiques en un complexe bleu tungstomolybdique.

Une prise de 125 µl de l'extrait dilué 10 fois est mélangée avec 500 µl d'eau distillée et 125 µl du réactif de Folin-Ciocalteu¹.

¹Ce réactif est un acide jaune constitué par un mélange d'acide phosphotungstique ($H_3PW_{12}O_{40}$) et d'acide phosphomolybdique ($H_3PMo_{12}O_{40}$). Il est réduit lors de l'oxydation des phénols, en un mélange d'oxydes bleus de tungstène et de molybdène (Ribéreau-Gayon, 1968). La coloration produite, dont l'absorption maximum est comprise entre 725 et 750 nm est proportionnelle à la quantité de polyphénols présents dans les extraits végétaux.

Après une agitation vigoureuse du mélange en 60 s suivie d'un repos de 3 min, une prise de 1250 μl de CO_3Na_2 à 7 % est additionnée. Le mélange obtenu est ajusté par 3 ml d'eau distillée. Après un repos de 90 min dans l'obscurité, la lecture de l'absorbance (Figure 23 b) est effectuée à une longueur d'onde de 760 nm dans des cuves spectro de 3 ml. La gamme d'étalonnage est préparée avec de l'acide gallique à des concentrations variant de 10 à 250 mg.l^{-1} . La mesure des densités optiques des solutions a été effectuée à l'aide d'un spectrophotomètre à double faisceaux (SHIMADZU UV-2401PC) relié à un ordinateur (Figure 23 c). La technique à double faisceaux nous a permis d'éliminer l'absorbance du blanc et de donner directement la densité optique de l'échantillon. Pour s'assurer d'une fiabilité de résultats, la mesure de chaque dosage a été réalisée en trois essais, puis la moyenne des densités optiques mesurées a été calculée. La concentration en polyphénols de la solution, déterminée en rapportant l'absorbance de l'extrait sur la droite d'étalonnage, est exprimée en microgrammes d'équivalent acide gallique par gramme de matière sèche de maïs ($\mu\text{g EAG.g}^{-1}\text{ MS}$). L'équation de la droite permettant de calculer la concentration des polyphénols dans le mélange réactionnel est de la forme : Absorbance (760 nm) = a * Concentration + b.

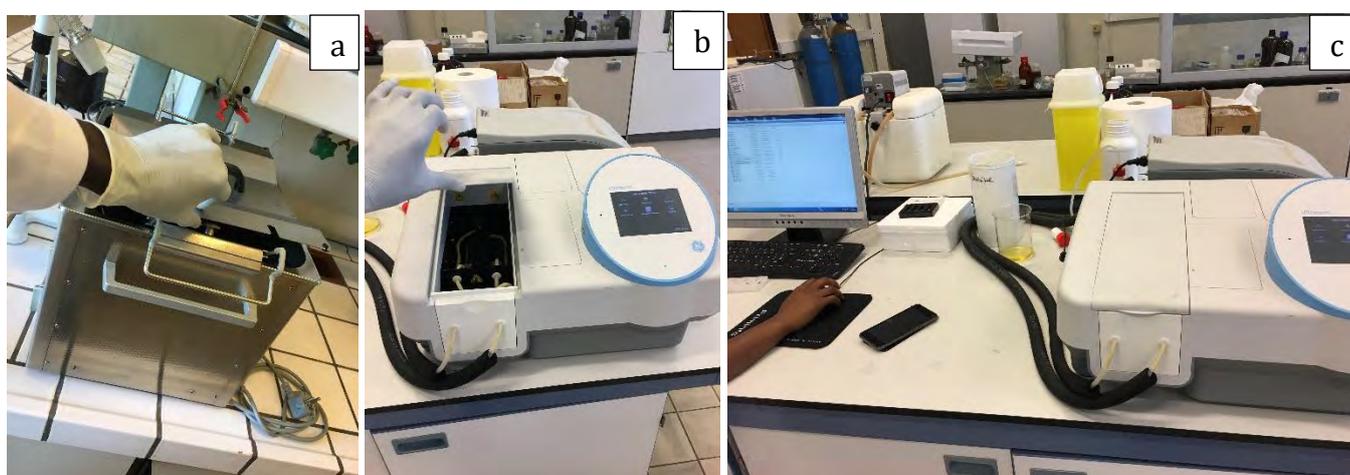


Figure 23 : Spectrophotomètre de mesure des polyphénols (D.O.) des grains

III.1.2.2.2 Identification et quantification des acides férulique et p-coumarique

L'identification et la quantification des acides férulique ($\text{C}_{10}\text{H}_{10}\text{O}_4$; 194,18 g.mol^{-1}) et p-coumarique ($\text{C}_9\text{H}_8\text{O}_3$; 164,15 g.mol^{-1}) peuvent être réalisées par diverses méthodes (Stalikas, 2007 ; Barberousse *et al.*, 2008). Il existe des Chromatographies en Phase Gazeuse-Spectrométrie de Masse (GC-MS), en Phase Liquide-Spectrométrie de Masse (LC-MS), en Phase Liquide à Haute Performance (HPLC), HPLC-MS, HPLC-UV, *etc.*

Au cours de ces dernières années, l'HPLC a été l'une des techniques séparatives les plus utilisées pour les acides phénoliques, due à son pouvoir de résolution, sa reproductibilité et spécificité très élevés. En effet, la chromatographie en phase liquide a permis de réaliser des analyses qui n'étaient pas possibles auparavant avec les techniques sur couches minces ou en phase gazeuse.

Dans ce travail, les acides férulique et p-coumarique ont été mesurés par HPLC-UV sur les extraits de farine de maïs obtenus précédemment dans le dosage des polyphénols totaux. La HPLC-UV est une chromatographie en phase liquide à haute performance couplée à un système de détection à absorption UV, qui permet la séparation ou la purification de composés en vue de leur identification et de leur quantification.

Avant l'analyse, tous les extraits de maïs ont été filtrés à travers un filtre membranaire de 0,45 μm (Chromafil® Pet-45/15 MS, Macherey-Nagel, Germany) (Figure 24b). Puis, la séparation a été effectuée par un système de HPLC-UV associant une pompe automatique (P680) et un détecteur à absorption UV à barrette de diode. Un injecteur automatique (ASI-100) est utilisé pour introduire 20 μL d'extraits phénoliques (phase mobile) dans une colonne apolaire (phase stationnaire) Omnispher 3 C18 (longueur : 100 mm, taille des particules : 3 μm , diamètre interne : 3 mm) (Figure 24a), installée dans un compartiment thermorégulé à une température constante de 30 °C. Au sein de la colonne, les extraits sont élués en fonction de leur affinité avec la phase stationnaire de la colonne. L'éluion a été effectuée avec un gradient d'éluion impliquant un éluant A (eau acidifiée, $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_3\text{PO}_4$ 10-2M) et un éluant B (100 % acétonitrile) pour un débit constant de 0,7 mL/min (Figure 24d). Le gradient d'éluion est le suivant : 0 min 5 % B ; 10 min 10 % B ; 20 min 36 % B ; 25 min 100 % B ; 30 min 100 % B ; 31 min 5 % B et 32 min 0 % B. Les acides phénoliques séparés et détectés ont été identifiés grâce à leurs temps de rétention et leurs spectres UV recueillis par un ordinateur muni d'un logiciel d'acquisition et d'exploitation de données (Figure 24e). Etant donné que l'acide férulique présente deux maxima d'absorption, à 290 et à 310 nm et l'acide p-coumarique un épaulement à 290 nm et un maximum d'absorption à environ 320 nm (Akin, 1995), la détection a été réglée à des longueurs d'ondes $\lambda = 290$, $\lambda = 310$ et $\lambda = 320$ nm. Un étalon a été préparé avec un mélange d'acides férulique à 99 % et p-coumarique à 98 % (50/50) à 5 mg pour 50 ml de méthanol ($C_{\text{SM}} = 0,1\text{mg/ml}$). A partir de cette solution mère (SM), des solutions filles ont été préparées par dilution dans le méthanol (MeOH) comme suit.

$C_4 = 1\text{ml (SM)} + 50\text{ ml MeOH (}C_4 = 0,2\text{mg/100 ml)}$; $C_3 = 1\text{ml (SM)} + 100\text{ ml MeOH (}C_3 = 0,1\text{mg/100 ml)}$; $C_2 = 0,5\text{ml (SM)} + 100\text{ ml MeOH (}C_2 = 0,05\text{mg/100 ml)}$; et $C_1 = 0,2\text{ml (SM)} + 100\text{ ml MeOH (}C_1 = 0,02\text{mg/100 ml)}$. Un blanc a été réalisé avec de l'eau distillée.

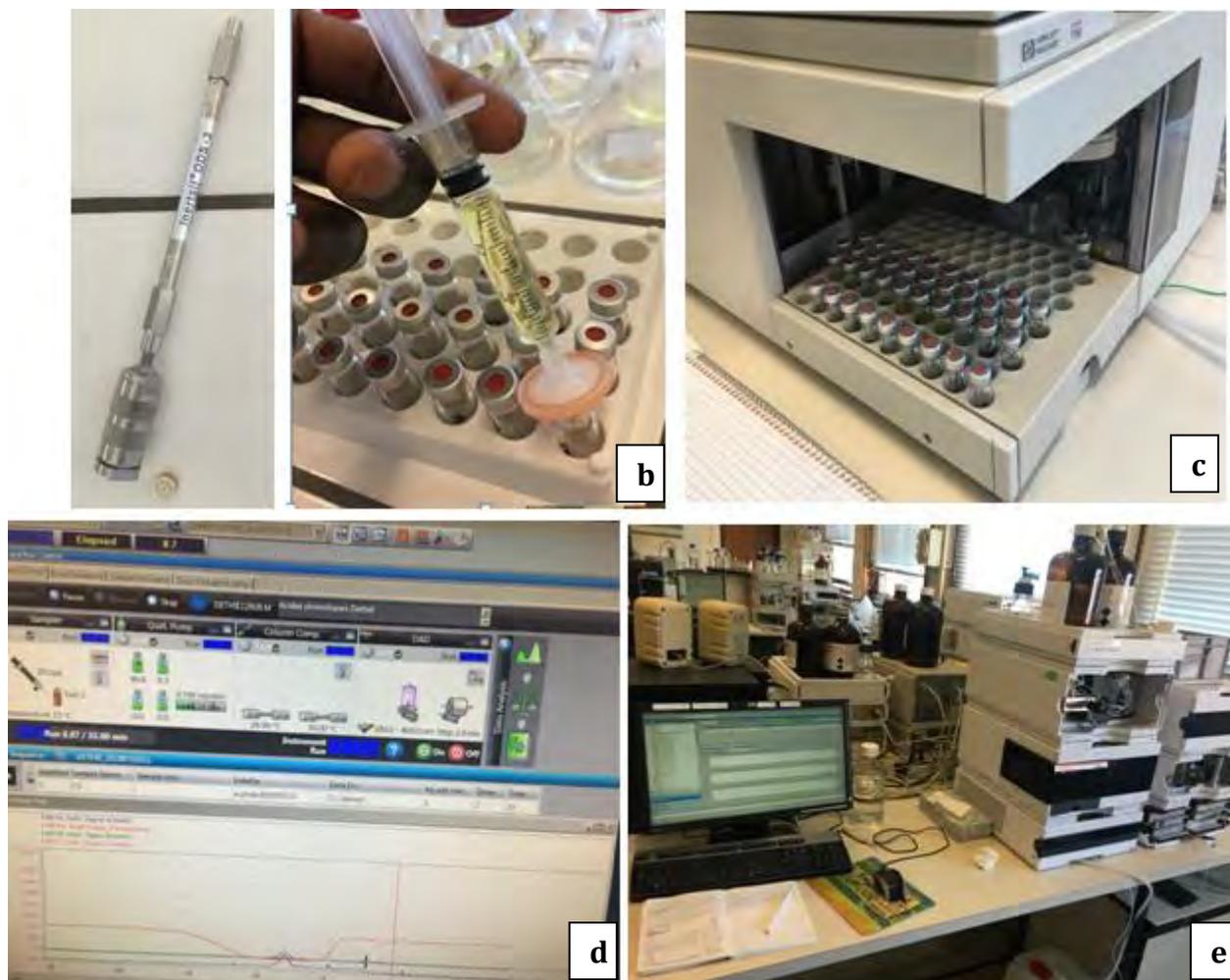


Figure 24 : Dispositif de l'analyse qualitative des acides phénoliques par HPLC

III.1.2.3 Evaluation de la matière grasse

III.1.2.3.1 Mesure de la matière grasse

L'extraction de la matière grasse a été effectuée selon la méthode de Folch *et al.* (1957). C'est une méthode de référence basée sur l'utilisation de solvants organiques pour extraire la totalité de la matière grasse contenue dans les aliments.

Une prise d'essai de 5 g (M) de farine a été mise en solution avec 50 mL de mélange chloroforme/méthanol (2/1, v/v) dans un ballon Schott de 100 ml à trois répétitions pour chaque variété. Le mélange était agité pendant une nuit (Figure 25a) puis filtré sur filtre plissé.

Le précipité a été lavé avec le même mélange, puis le filtrat obtenu a été mis dans des ampoules à décanter. Dans chaque ampoule, 20 ml de NaCl 0,58% ont été ajoutés, puis l'ensemble est agité vigoureusement pendant 60 secondes et laissé décanter pendant une nuit. Parmi les deux phases obtenues (Figure 25b) (en haut : méthanol + sel + eau contenant de protéines et en bas : phase chloroforme contenant la matière grasse), la phase chloroforme a été récupérée et filtrée sur Na₂SO₄ (qui capte l'eau restant dans le chloroforme) dans un ballon Büchi taré (M1) (Figure 25c). Le chloroforme est évaporé à sec à 35 °C au rotavapeur (Figure 25d), puis la matière grasse obtenue est laissée au dessiccateur pendant 15 minutes et pesée (M2). La teneur en matière grasse est exprimée en g pour 100 g matière sèche de maïs.

$$\% \text{ Matière grasse} = \frac{M2-M1}{M} \times 100$$

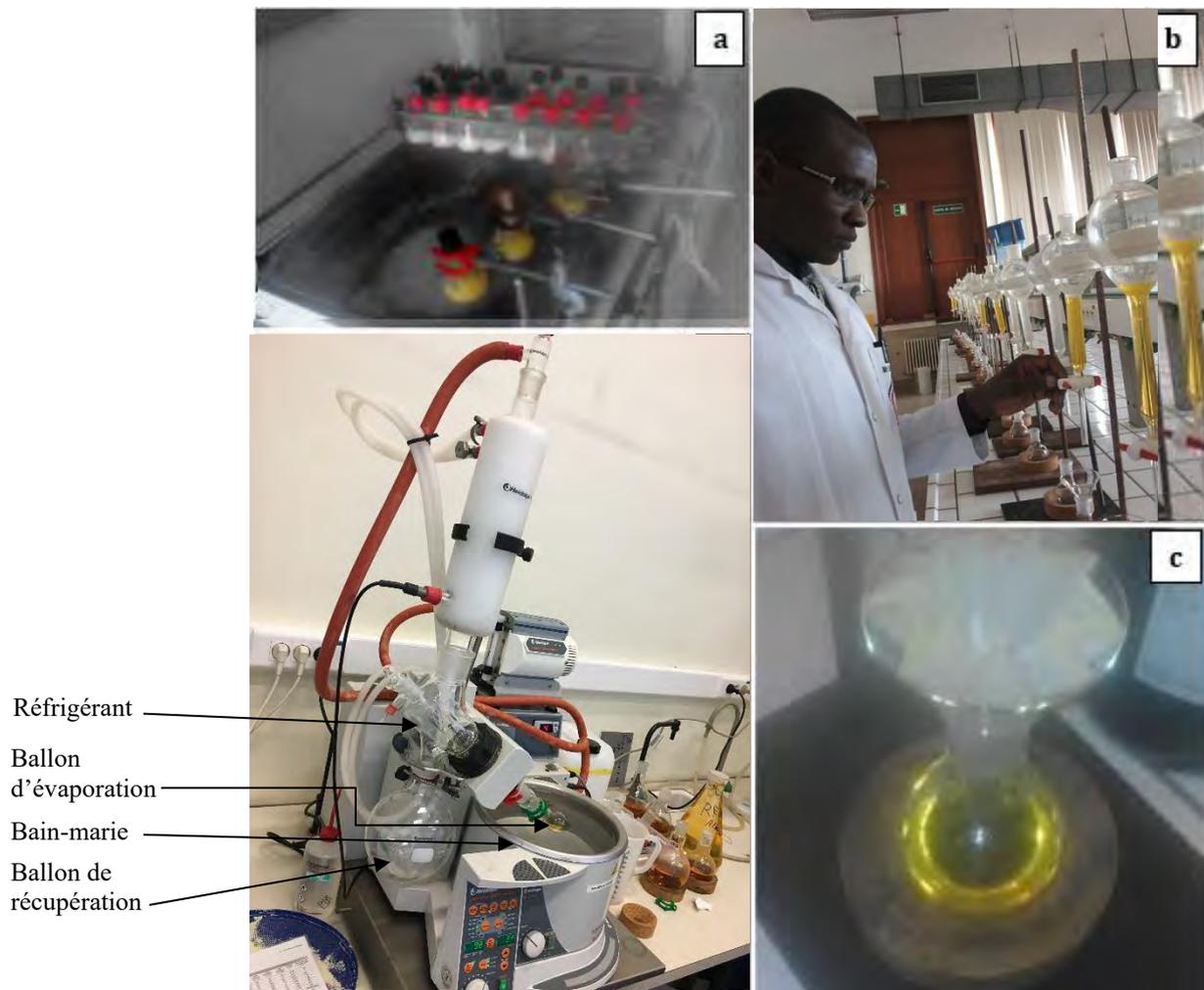


Figure 25 : Dispositif pour la mesure des matières grasses selon la méthode Foch

III.1.2.3.2 Analyse de la matière grasse et caractérisation des acides gras

La matière grasse obtenue précédemment a été méthanolysée par un mélange BF₃/méthanol pour obtenir des esters méthyliques. Ces esters ont été analysés selon la méthode FAME (ISO 12966-2:2017) par une Chromatographie en Phase Gazeuse de type Trace Ultra GC de marque Thermo Electron Corporation (Interscience, Louvain-La-Neuve, Belgium) couplée à un détecteur à ionisation de flamme (GC-FID). La GC est une méthode de séparation mais aussi d'analyse, qui, couplée à un détecteur à ionisation de flamme, permet d'obtenir à la fois des informations sur la nature des molécules à partir des temps de rétention et sur leur proportion sur la base des aires intégrées.

Pour ce faire, 10 mg de matières grasses ont été mélangés avec 0,2 ml d'hexane et 0,5 ml de réactif au BF₃ (méthanol /BF₃ 14% /hexane (55 :25 :20)) dans un tube hermétiquement fermé et placé dans un bain-marie à 70°C pendant 1h30min. Ensuite, 0,5 ml d'une solution saturée en NaCl et 0,2 de H₂SO₄ à 10 % ont été ajoutés. L'ensemble est bien agité avant d'y rajouter 8 ml d'hexane. Une prise de 0,5 µl de la couche supérieure (Figure 26a) est injectée dans le système GC-FID pour analyser la composition en acides gras. Les échantillons, placés sur des chromarods (Figure 26b), sont injectés de façon automatique dans le chromatographe. Les esters méthyliques d'acides gras à séparer sont entraînés par un gaz vecteur inerte (phase mobile) et élués en fonction de leur volatilité et de leur affinité avec la phase stationnaire (colonne). La colonne, placée dans une enceinte à température régulée communément appelée four, se présente sous la forme d'un tube en spirale. A la sortie de la colonne, les constituants du mélange sont brûlés (au sein d'une flamme) grâce au mélange air-hydrogène et transformés en ions qui créent une tension. Cette tension est amplifiée et envoyée à l'enregistreur qui trace le pic dont la surface est proportionnelle à la quantité de matière brûlée. La détection, l'identification et la quantification des différents acides gras des matières grasses ont été réalisées à partir de leurs temps de rétention et spectre de masse enregistrés par un logiciel de l'ordinateur (Figure 26c). Un témoin eau et un témoin solution standards (molécules pures) ont été injectés au préalable dans le chromatographe.



Figure 26 : Dispositif de GC-FID de l'analyse des acides gras

III.1.2.4 Evaluation des protéines du maïs

Les protéines brutes des échantillons ont été déterminées à partir des teneurs en azote de la farine de maïs. La méthode de combustion de Dumas (méthode 981.10 ; AOAC, 1990) a été utilisée sur trois répétitions de 200 mg de farine en système de combustion et d'analyse Rapid N cube® (elementar, Nebraska, USA). C'est une méthode plus puissante que la méthode traditionnelle de Kjeldahl (Simonne *et al.*, 1997 ; AOAC, 2002 ; Müller, 2017). Elle fait un dosage précis de l'azote (N) des produits et donne des valeurs de N₂ (convertissant N en N₂ par la combustion) plus fiables. La farine est préparée sous une forme de petits disques de 200 mg (Figure 27a) et soumise à une combustion de 960 °C de température en présence d'oxygène (O₂). Grâce à un carrousel à 60 puits (Figure 27b), les échantillons sont incorporés de manière automatique dans le tube de combustion. Le gaz issu de cette combustion passe par une série de tubes (Figure 27c) contenant des produits qui visent à piéger et à éliminer tous les gaz autres que le N₂. Ensuite, l'azote gazeux (N₂) arrive au détecteur pour y être détecté et mesuré en % d'azote.

Le détecteur est un cataromètre, détecteur thermo-conductif qui fonctionne sur le principe d'une différence de conductivité thermique entre deux flux gazeux. Dans la chambre de référence, seul s'écoule le gaz de référence (CO₂), et dans la seconde, circule le mélange gazeux CO₂ + N₂. La différence de conductivité entre les deux gaz est alors enregistrée (Figure 27d) sous la forme d'un pic (par un ordinateur) en fonction du temps (5 min pour chaque échantillon) et ensuite intégrée et quantifiée. Des témoins à base d'acide aspartique ont été utilisés pour générer un facteur de correction. Ils ont été analysés, puis comparés à leur pourcentage d'azote théorique. Ce facteur de correction était multiplié aux pourcentages d'azote mesurés dans les échantillons en vue de ressortir la teneur réelle en azote de chaque échantillon. Chaque témoin a été mesuré à 3 reprises et passé dans la machine après les 3 blancs et le conditionnement. Considérant que la protéine du maïs contient 16% d'azote (AOAC, 1984 ; Balogun & Fetuga, 1986 ; Amoo, 1998), la teneur en protéines totales des échantillons a été estimée à partir de la protéine brute : % "N" x 6,25, avec 6,25 comme facteur de conversion pour le maïs (FAO & OMS, 2005). Puisque l'échantillon contient de l'azote provenant des protéines mais également de sources non protéiques, la valeur calculée (% N x 6,25) est une quantité approximative de protéines plutôt que vraie. Cependant, ce facteur de conversion (6,25) est calculé à partir du pourcentage moyen d'azote pouvant contenir une erreur appréciable si l'azote est dérivé de matières non protéiques ou d'une protéine de composition inhabituelle.

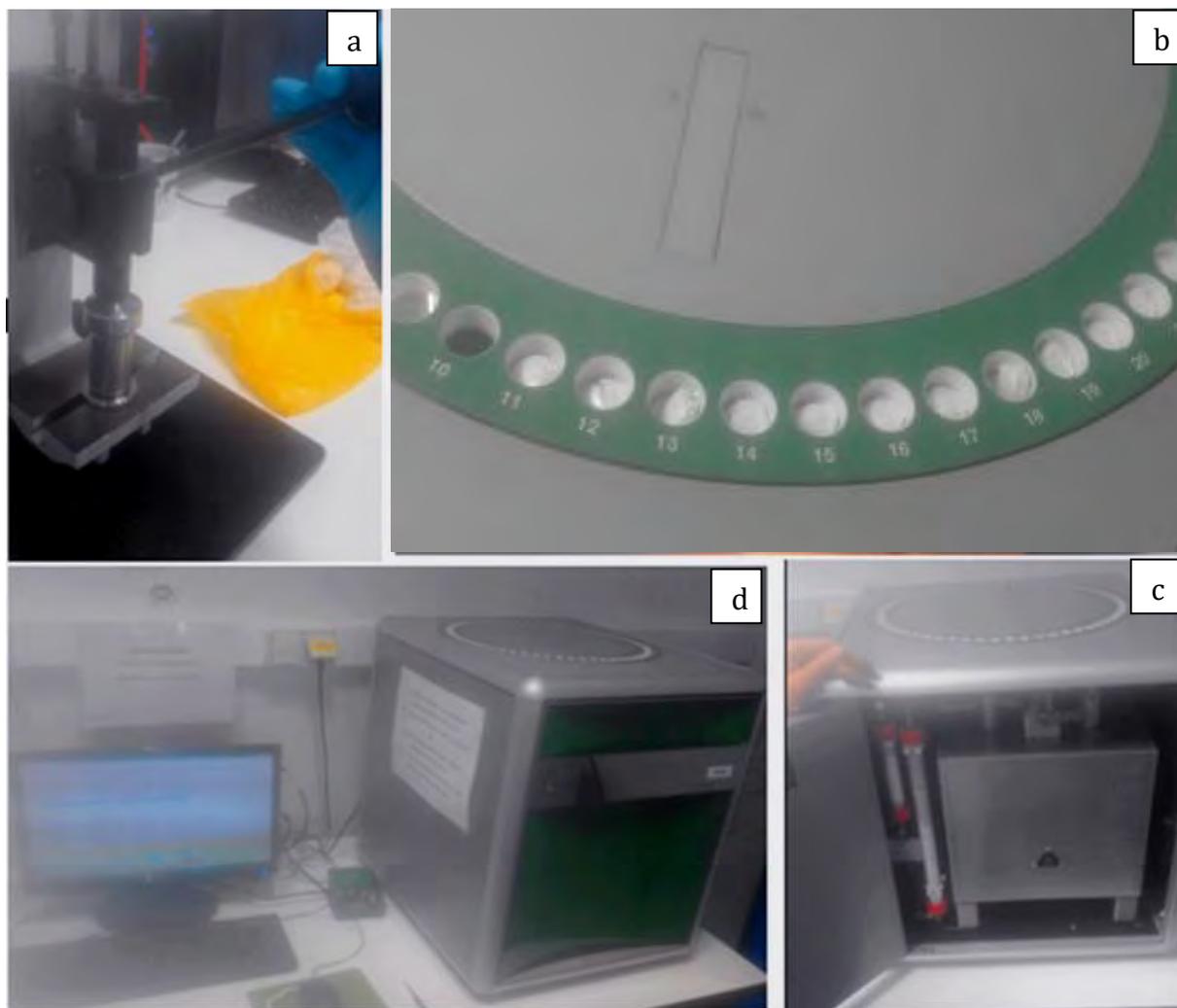


Figure 27 : Dispositif expérimental de Dumas pour l'évaluation des protéines

III.1.2.5 Mesure de l'amidon total

La teneur en amidon des échantillons a été déterminée suivant la méthode polarimétrique d'EWERS (1965) selon la norme (ISO 10520: 1997 ; AFNOR, 1998) à l'aide d'un polarimètre numérique (Bellingham & Stanley Ltd. ADP220, UK) (Figure 28a).

La méthode comprend une double détermination.

Dans la première, 2,5 g à 1 mg près de farine de maïs ont été traités à chaud par l'acide chlorhydrique dilué pendant 15 min dans un bain d'eau bouillante. Après le retrait au bout des 15 min, la solution est déféquée à l'aide des réactifs de CARREZ (CARREZ I et CARREZ II) et ensuit filtrée. A partir de ce filtrat, le pouvoir rotatoire total (PRT) de la solution est mesuré à trois reprises dans un tube de 200 mm (Figure 28b) au polarimètre.

Dans la deuxième, 5 g à 1 mg près de farine sont extraits par l'éthanol à 40 % (en vue d'extraire les substances solubles dans l'éthanol à 40 %).

Après une acidification du filtrat par HCL, une défécation et une filtration, le pouvoir rotatoire a été mesuré dans les mêmes conditions que lors de la première détermination. La différence entre les deux pouvoirs rotatoires, multipliée par un facteur connu, donne la teneur en amidon de l'échantillon en matière sèche selon la formule suivante :

$$\% \text{ Amidon} = 9,4636 * \left[\left(\frac{S}{\text{Poids réel} * \text{PRT}} \right) - \left(\frac{S'}{\text{Poids réel} * \frac{\text{EtOH}}{2}} \right) \right]$$

S = pouvoir rotatoire total (PRT) en degrés saccharimétrique

S' = pouvoir rotatoire en degrés saccharimétrique, donné par les substances solubles dans l'éthanol 40% (EtOH).

Un bon usage et une calibration correcte du polarimètre sont très importants. Le principe de mesure du polarimètre est décrit dans la figure (28c).

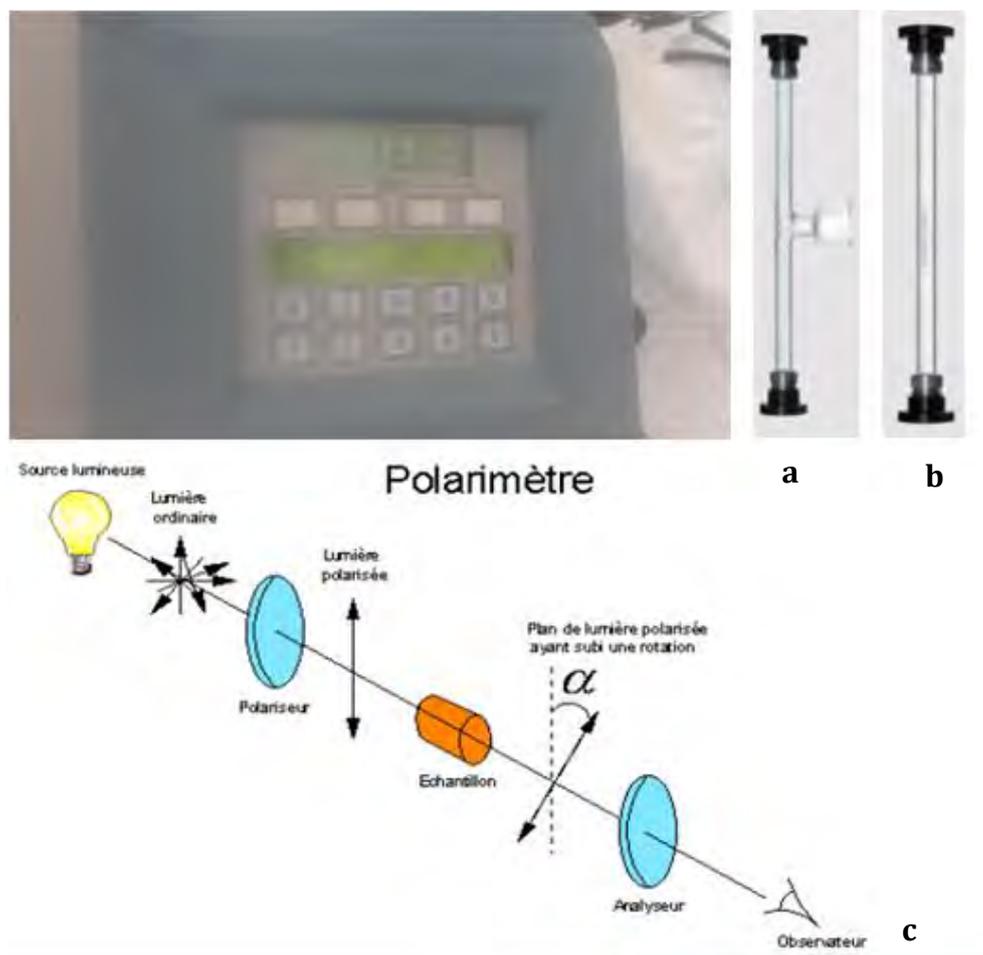


Figure 28 : Polarimètre de mesure de l'amidon total

III.1.2.6 Mesure de l'amylose présent dans l'amidon total

La teneur en amylose des amidons a été évaluée avec la méthode de Morrison et Laignelet (1983). Cette méthode détermine la quantité d'amylose dans l'amidon par réaction colorimétrique en mesurant l'absorbance du complexe bleu « amylose-iode » formé.

Une prise précise de 50 mg de matière sèche de farine a été introduite dans un tube en verre contenant 5 ml de solution Urée/diméthyl-sulfoxyde (V/V : 50 / 500 ml), puis la solution obtenue est vortexée jusqu'à dissolution complète de la farine. Le tube est ensuite trempé dans un bain-marie à 95 °C, vortexé jusqu'à l'obtention d'une solution limpide, puis est laissé au repos pendant 60 min avant d'être retiré et refroidi. Une prise de 100 µl de cette solution est mélangé avec 9,7 ml d'eau distillée et 200 µl de solution KI/I2 (m/m : 0,5/0,05 g) à deux répétitions par tube, puis le mélange obtenu est laissé au repos pendant 20 min dans le noir. Un blanco est préparé avec 9,7 ml d'eau distillée, 100 µl de solution Urée/ diméthyl-sulfoxyde vierge et 200 µl de solution KI/I2. Un étalon a été aussi préparé avec le standard mégazyme 66% d'amylose (AM) et l'amylopectine (AMP) en quatre solutions : 0% (m/m : 0/57,1), 16,50% (m/m : 14,4/42,9), 33% (m/m : 28,7/28,6) et 66% (m/m : 57,1/0) de megazyme/AMP. La lecture des densités optiques (D.O.) du complexe bleu formé « amylose-iode » a été faite par un spectrophotomètre à UV visible à double faisceaux (SHIMADZU UV-2401PC) décrit précédemment (Figure 23) à 635 nm dans des cuves spectro de 3 ml avec les références H₂O et blanco (mélange sans extrait de farine). La courbe d'étalonnage a été faite avec les quatre standards. La mesure des D.O. étant directement proportionnelle à la concentration (pas de facteur de correction), les teneurs en amylose des échantillons ont été calculées sur la courbe standard.

III.1.2.7 Analyses statistiques

Les données des paramètres morpho-physiques et biochimiques des grains ont été saisies sur Excel et traitées avec le logiciel R (versions R-3.0.0 et R-3.4.1) suivant les recommandations de Bloomfield (2014). Des tests paramétriques (ANOVA à un facteur et Tukey) ont été utilisés pour analyser les variances après vérifications et confirmations de la normalité (test de normalité de Shapiro-wilk) et de l'homogénéité des variances (test de Bartlett) des séries de données. Des tests non paramétriques (Kruskal-Wallis et Wilcoxon) ont été utilisés pour analyser les données dont les séries ne suivaient pas une loi normale ou qui n'avaient une variance homogène.

La comparaison des moyennes, des écart-types et des variances a permis de ressortir la significativité des différences de moyennes.

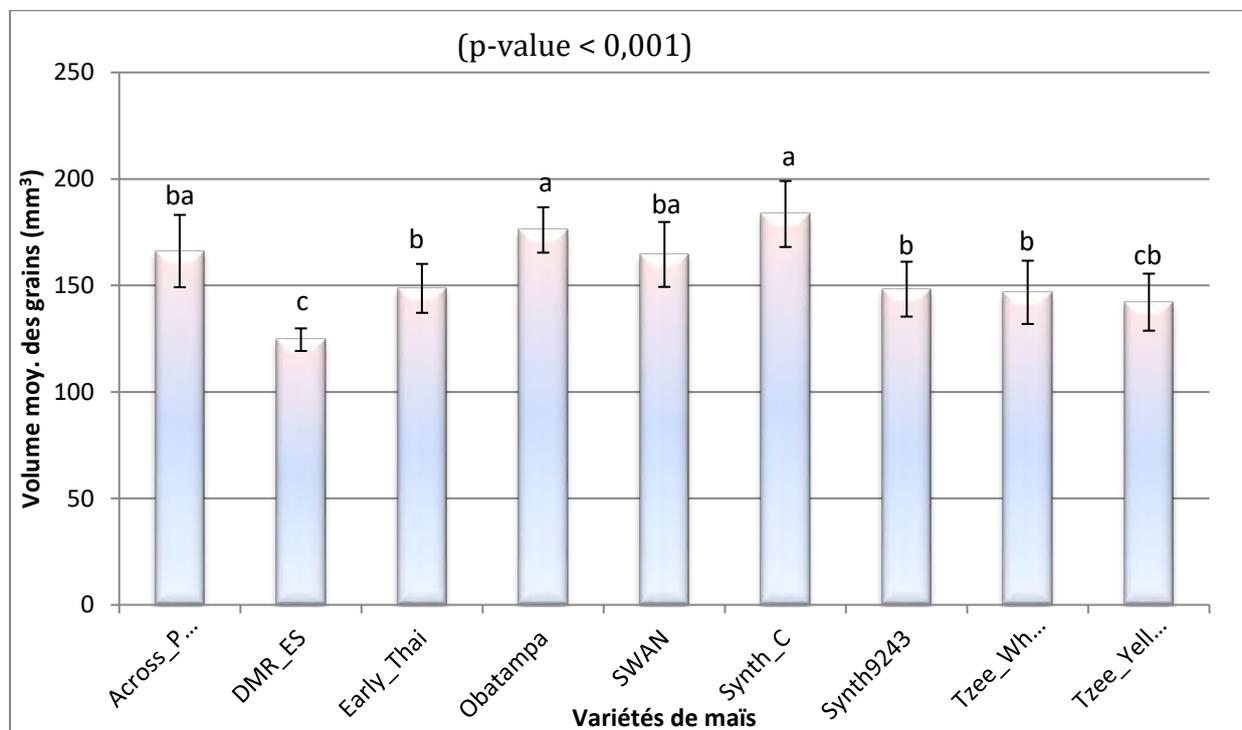
Des analyses de liaison avec la méthode Spearman (matrices de corrélations) ont été effectuées pour déterminer les interactions entre les variables. La significativité statistique a été appréciée sur la base des p-values.

III.2 Résultats et discussion

III.2.1 Caractéristiques morpho-physiques

III.2.1.1 Taille et volume des grains

Le volume des grains diffère de façon significative ((p-value < 0,001) en fonction des variétés de maïs (Figure 29). Le volume des grains des variétés étudiées varie de $124,54 \pm 5,29$ à $183,53 \pm 15,50$ mm³. La variété DMR-ES a les grains les plus petits avec $124,54 \pm 5,29$ mm³. Tandis que les variétés Synth-C, Obatampa, Across-Pool et SWAN ont les grains les plus volumineux, soient $183,53 \pm 15,50$; $176,04 \pm 10,66$; $166,13 \pm 16,98$ et $164,55 \pm 15,24$ mm³ respectivement. Les grains des autres variétés, telles qu'Early-Thaï ($148,61 \pm 11,49$ mm³), Synth-9243 ($148,24 \pm 12,89$ mm³), Tzee-White ($146,75 \pm 14,85$) et Tzee-Yellow ($142,13 \pm 13,40$) ont une taille intermédiaire, inférieure à 150 mm³.

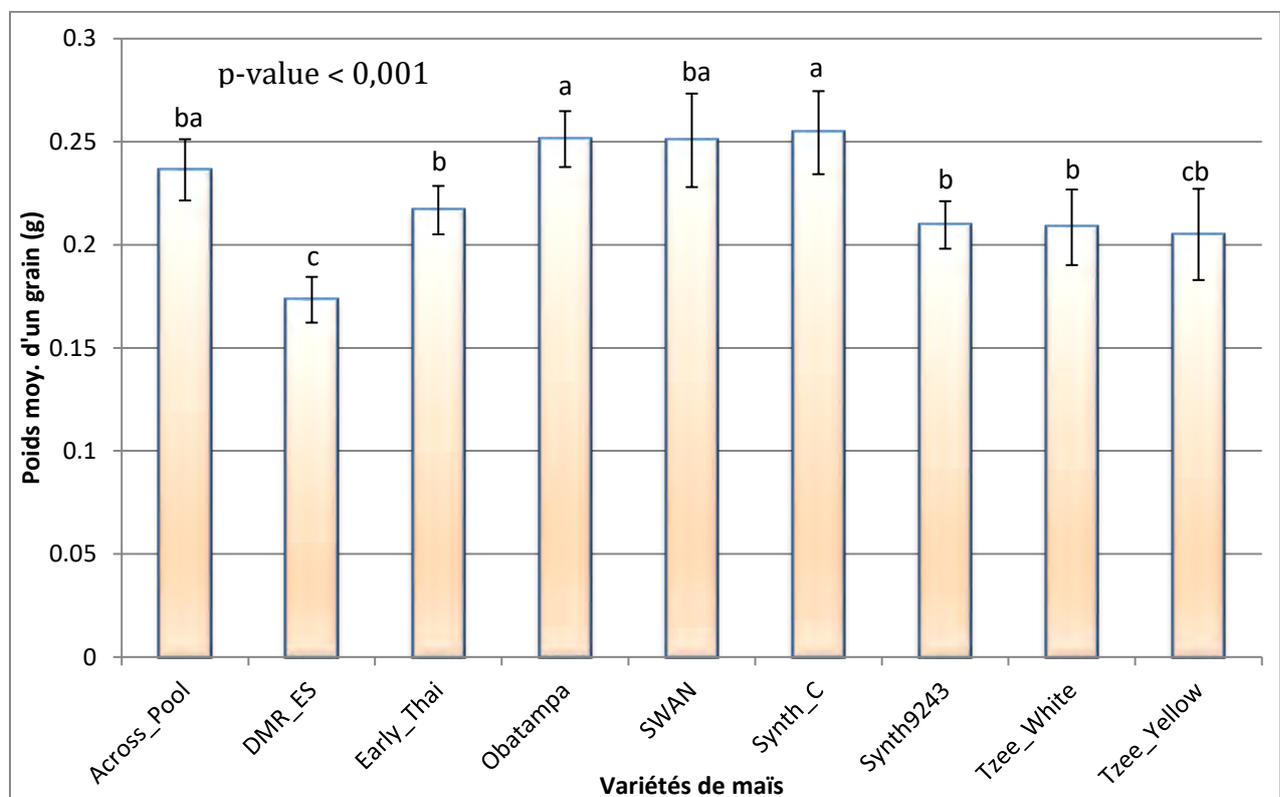


Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre les variétés à alpha = 0,05 lors du test de Tukey après le test ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 29 : Volume moyen des grains des variétés de maïs

III.2.1.2 Poids des grains

Le résultat de pesage du poids individuel des grains (Figure 30) révèle des variations significatives entre les variétés de maïs (p -value < 0,001). Nous avons enregistré des valeurs moyennes allant de $0,173 \pm 0,011$ à $0,254 \pm 0,020$ g par grain. Parallèlement au volume, les grains de la variété DMR-ES ont aussi le poids le plus petit, soit $0,173 \pm 0,011$ g. Contrairement, les variétés Synth-C, SWAN et Obatampa ont les grains les plus lourds, avec $0,254 \pm 0,020$, $0,251 \pm 0,023$ et $0,251 \pm 0,014$ g respectivement. Les variétés Early-Thaï, Synth-9243, Tzee-White, Tzee-Yellow et Across-Pool sont constituées de grains à moindre poids, soient $0,217 \pm 0,012$, $0,210 \pm 0,012$, $0,208 \pm 0,018$, $0,205 \pm 0,022$ et $0,236 \pm 0,015$ g respectivement.



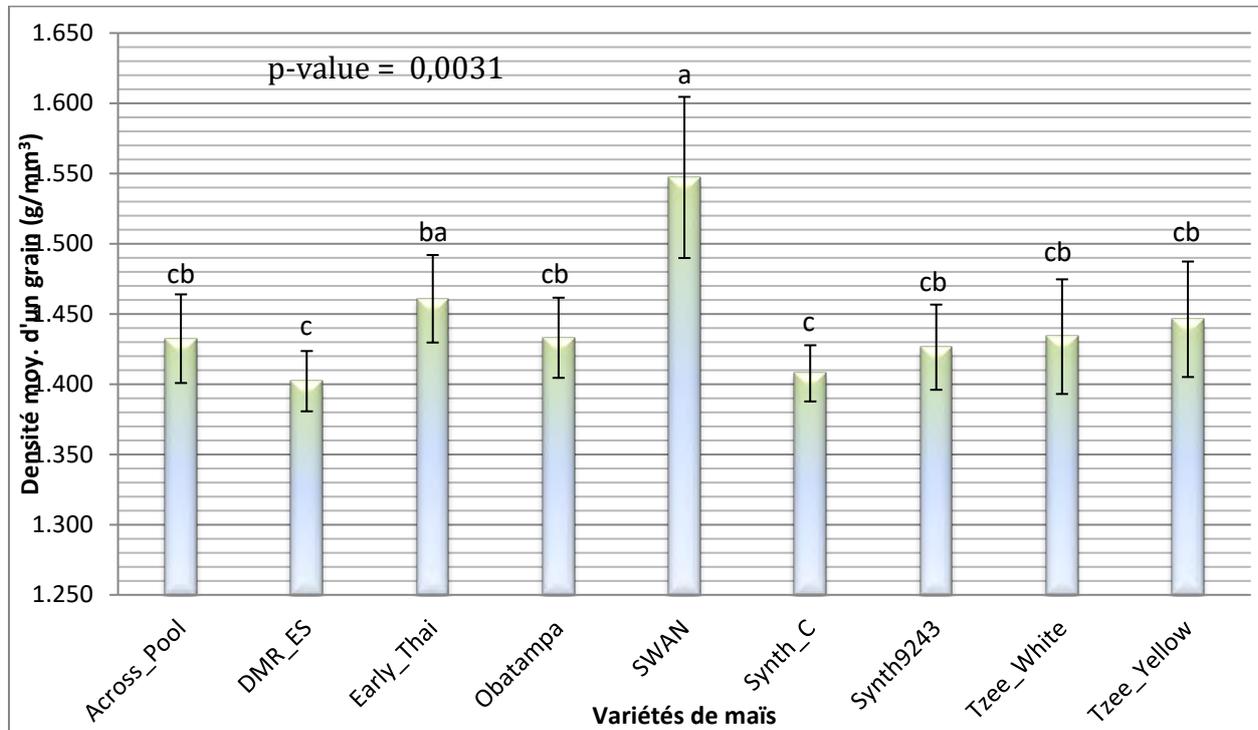
Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre les variétés à $\alpha = 0,05$ lors du test de Tukey après le test ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 30 : Poids moyen des grains des variétés de maïs

III.2.1.3 Densité des grains

Les grains de maïs présentent une densité qui varie significativement (p -value = 0,0031) entre les variétés (Figure 30). Les valeurs trouvées varient de $1,402 \pm 0,021$ à $1,547 \pm 0,057$ g/mm³ selon les variétés de maïs. Les densités les plus petites ont été enregistrées chez les grains des variétés DMR-ES ($1,402 \pm 0,021$ g / mm³) et Synth-C ($1,408 \pm 0,020$ g/mm³).

A l'autre extrémité, nous avons les variétés SWAN et Early-Thai qui ont les grains les plus denses, soit $1,547 \pm 0,057$ et $1,461 \pm 0,031$ g/mm³ respectivement. Ensuite, nous avons les variétés à grains de densités intermédiaires telles qu'Across-Pool ($1,432 \pm 0,032$ g/mm³), Obatampa ($1,433 \pm 0,029$ g/mm³), Synth-9243 ($1,426 \pm 0,030$ g/mm³), Tzee-White ($1,434 \pm 0,041$ g/mm³) et Tzee-Yellow ($1,446 \pm 0,041$ g/mm³).



Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre les variétés à $\alpha = 0,05$ lors du test de Tukey après le test ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 31 : Densité moyenne des grains des variétés de maïs

III.2.1.4 Paramètres de couleur des grains

Les courbes spectrales (Figure 32) montrent les tracés des longueurs d'onde en fonction de la réflectance, de la transmittance, ou de l'absorbance pour toute la plage de balayage du spectrophotomètre. Trois groupes de tracés (a, b et c) sont identifiés, caractérisant trois couleurs de grains que sont le blanc clair (a), le blanc moins clair (b) et le jaune (c).

Tableau 11 : Paramètres de couleurs des grains

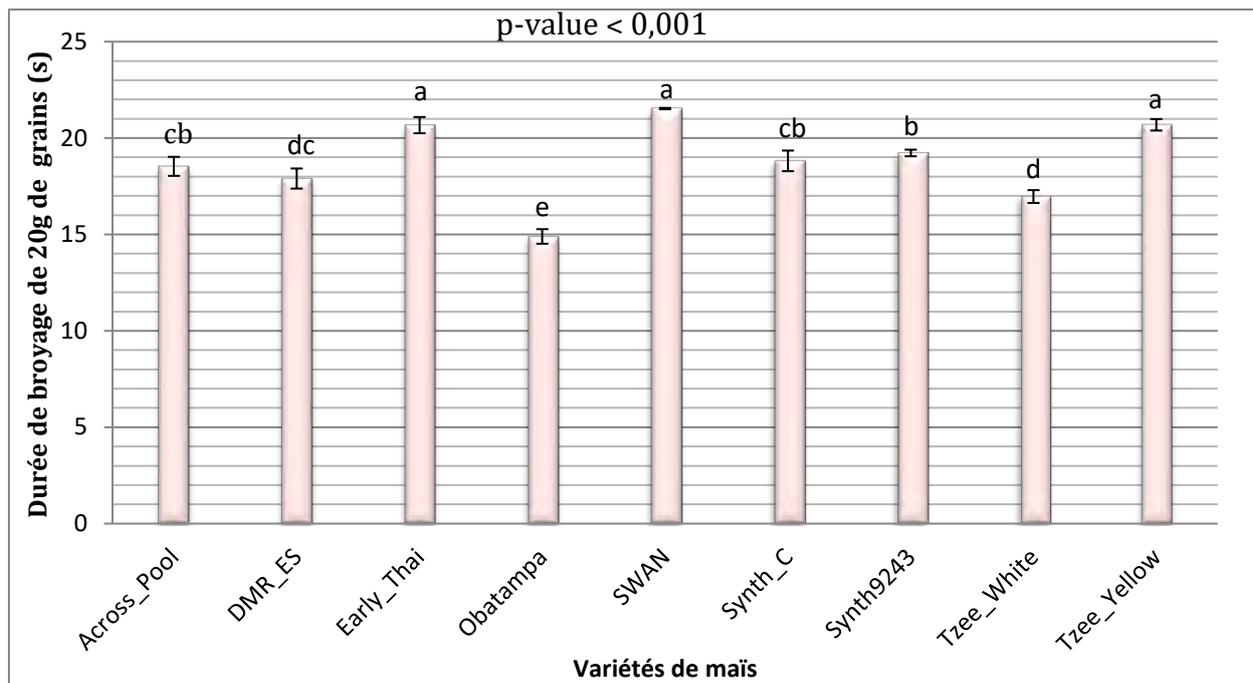
Variétés	L*	a*	b*	ΔE	ΔC	H
Tzee-White	69,56±0,58 ^a	4,56±0,31 ^{bc}	32,23±1,02 ^b	76,81±0,46 ^a	32,55±1,05 ^b	8,05±0,33 ^{cd}
Early-Thaï	64,03±0,42 ^{bc}	14,27±0,98 ^a	40,26±1,92 ^a	76,99±0,95 ^a	42,72±2,08 ^a	19,51±0,74 ^a
SWAN	62,94±1,85 ^c	15,37±1,36 ^a	40,24±2,53 ^a	76,31±2,14 ^{ba}	43,08±2,77 ^a	20,90±1,01 ^a
DMR-ES	69,92±0,82 ^a	3,90±0,62 ^{bc}	29,25±1,08 ^c	75,90±0,68 ^{ba}	29,51±1,14 ^{cb}	7,56±0,96 ^{cd}
Tzee-Yellow	62,77±1,21 ^c	14,49±1,72 ^a	40,74±2,88 ^a	76,29±0,96 ^{ba}	43,25±3,27 ^a	19,53±1,09 ^a
Obatampa	70,28±1,17 ^a	3,69±0,47 ^c	28,86±0,36 ^c	76,07±0,99 ^{ba}	29,10±0,40 ^c	7,27±0,84 ^{cd}
Across-Pool	70,47±0,85 ^a	3,28±0,26 ^c	27,85±0,77 ^c	75,85±0,51 ^{ba}	28,04±0,79 ^c	6,71±0,40 ^d
Synth-C	68,68±1,23 ^a	4,36±0,22 ^{bc}	29,00±0,50 ^c	74,68±1,18 ^b	29,33±0,50 ^c	8,54±0,45 ^c
Synth-9243	65,37±1,23 ^b	5,36±0,25 ^b	28,01±0,47 ^c	71,32±1,17 ^c	28,51±0,47 ^c	10,84±0,50 ^b
<i>Significativité (p-value)</i>	***	***	***	***	***	***

Les lettres a, b, c, ... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre variétés à $\alpha = 0,05$ lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

L* = Clarté de la surface du grain (0 à 100 = sombre à clair), **a*** = degré de couleur rouge à vert (+ a* = plus de rouge, -a* = plus de vert), **b*** = degré de couleur jaune à bleu (+ b* = plus de jaune, -b* = plus de bleu), **ΔE** = intensité des couleurs, **ΔC** = intensité du au chroma (qui reflète la pureté de la couleur), **H** = angle de teinte ou coordonnées cylindriques de teinte,

III.2.1.5 Dureté des grains

Le résultat sur la dureté des grains des variétés étudiées révèle une différence de durée de broyage hautement significative (p -values < 0,001), qui va de 14,90±0,38 (Obatampa) à 21,53±0,03 (SWAN) secondes (Figure 33). La durée écoulée pour broyer complètement une prise d'essai de 20 g de maïs renseigne sur la dureté des grains de la variété. Les grains des variétés SWAN, Tzee-Yellow et Early-Thaï s'avèrent plus durs, avec des temps de broyage de 21,53±0,03, 20,69±0,30 et 20,67±0,42 secondes respectivement. A l'inverse, les grains de la variété Obatampa (14,90±0,38 s) se révèlent plus mous.



Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre les variétés à $\alpha = 0,05$ lors du test de Tukey après le test ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 33 : Durée de broyage des grains de maïs (dureté des grains)

III.2.1.6 Matrice de corrélation entre paramètres morpho-physiques

La matrice de Spearman (Tableau 12) révèle de très fortes corrélations binaires entre les variables. La dureté des grains est fortement et positivement corrélée à la couleur rouge (a*) ($\rho = 0,805$; $P_{(\rho)} < 0,001$) et à la couleur jaune (b*) ($\rho = 0,533$; $P_{(\rho)} = 0,004$) et négativement liée à la couleur blanche (L*) ($\rho = -0,859$; $P_{(\rho)} < 0,001$) des grains. Le poids et le volume des grains s'avèrent aussi très fortement corrélés entre eux ($\rho = 0,904$; $P_{(\rho)} < 0,001$). Cette corrélation a été évoquée par Blandino *et al.* (2010).

Tableau 12 : Matrice de corrélations des paramètres morpho-physiques des grains

Variable	L*	a*	b*	H	ΔE	ΔC	Volume	Poids	Densité	Dureté
L*	1									
a*	-0,958***	1								
b*	-0,698***	0,757***	1							
H	-0,974***	0,970***	0,695***	1						
ΔE	-0,021.	0,198.	0,589**	0,045.	1					
ΔC	-0,715***	0,779***	0,997***	0,717***	0,572**	1				
Volume	0,170.	-0,176.	-0,280.	-0,158.	-0,016.	-0,286.	1			
Poids	0,041.	-0,065.	-0,159.	-0,015.	0,031.	-0,172.	0,904***	1		
Densité	-0,205.	0,170.	0,121.	0,182.	-0,009.	0,130.	-0,060.	0,154.	1	
Dureté	-0,859***	0,805***	0,533**	0,859***	0,013.	0,545**	-0,162.	-0,003.	0,096.	1

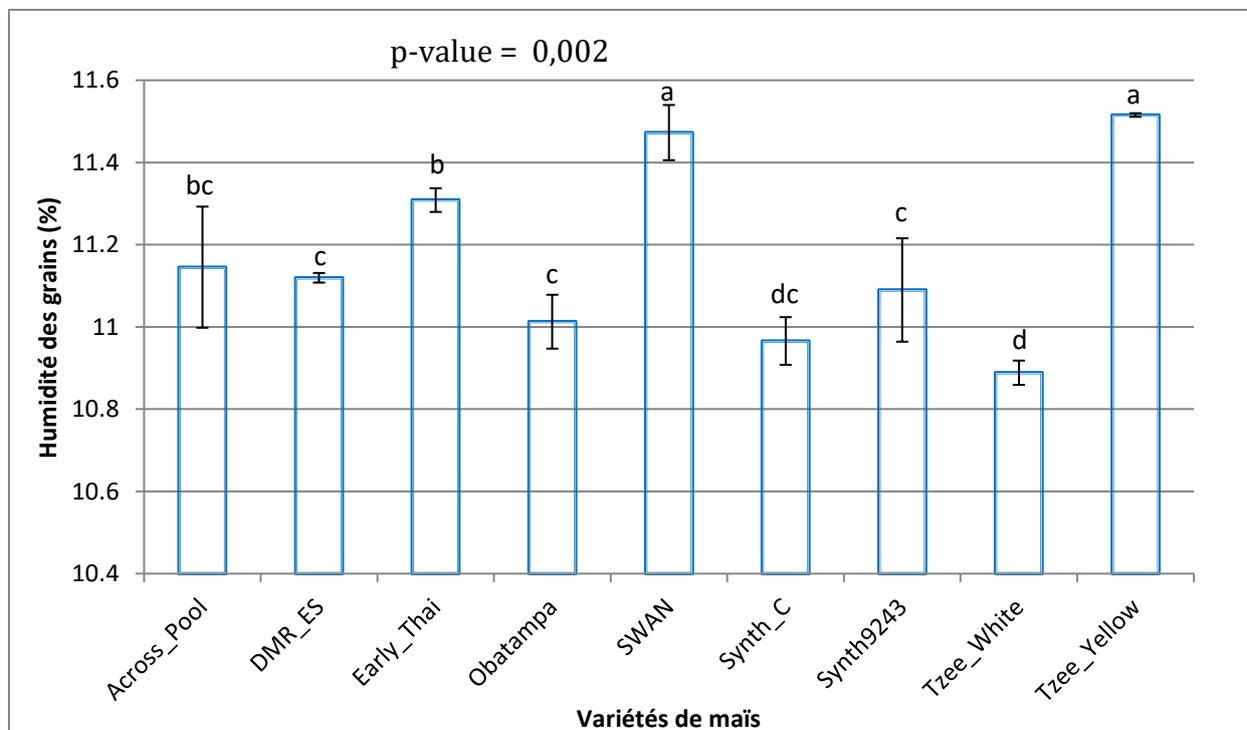
" * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif ; "." non significatif

L* = Clarté de la surface du grain, **a*** = degré de couleur rouge à vert, **b*** = degré de couleur jaune à bleu, **H** = angle de teinte ou coordonnées cylindriques de teinte, **ΔE** = intensité des couleurs, **ΔC** = intensité du au chroma (qui reflète la pureté de la couleur), **Volume** = Volume moyen d'un grain, **Poids** = Poids moyen d'un grain, **Densité** = Densité moyenne d'un grain, **Dureté** = Dureté moyenne d'un grain.

III.2.2 Caractéristiques biochimiques

III.2.2.1 Teneur en eau des gains (H.R)

L'humidité des grains de maïs enregistrée (Figure 34) varie significativement (p -value = 0,002) de $10,89 \pm 0,03$ % (Tzee-White) à $11,52 \pm 0,00$ % (Tzee-Yellow). Les variétés Tzee-Yellow, SWAN et Early-Thaï ont les teneurs en eau les plus fortes, soient $11,52 \pm 0,00$ %, $11,47 \pm 0,07$ et $11,31 \pm 0,03$ %, respectivement. Les humidités les plus petites sont enregistrées chez les grains des variétés Tzee-White ($10,89 \pm 0,03$ %) et Synth-C ($10,97 \pm 0,06$ %). Les grains des variétés Obatampa, Synth-9243, DMR-ES et Across-Pool ont des teneurs en eau intermédiaires ($11,01 \pm 0,07$ %, $11,09 \pm 0,13$ %, $11,12 \pm 0,01$ % et $11,15 \pm 0,15$ %, respectivement).



Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre les variétés à $\alpha = 0,05$ lors du test de Tukey après le test ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 34 : Teneur en eau des grains des variétés de maïs

III.2.2.2 Polyphénols totaux

Les quantités des composés phénoliques totaux sont déterminées à partir de l'équation de la régression linéaire ($y = 1,6174x + 0,0025$; avec y = absorbance et x = concentration en composés phénoliques du maïs) de la courbe d'étalonnage, tracée en utilisant l'acide gallique comme standard (Figure 35).

Puisque l'extrait du maïs a été dilué 10 fois, les valeurs obtenues sont multipliées par un facteur de dilution ($FD = 10 \text{ (fois)} * 10 (V_{\text{solution}})$) et exprimées en $\mu\text{g EAG/g MS}$ (Figure 36).

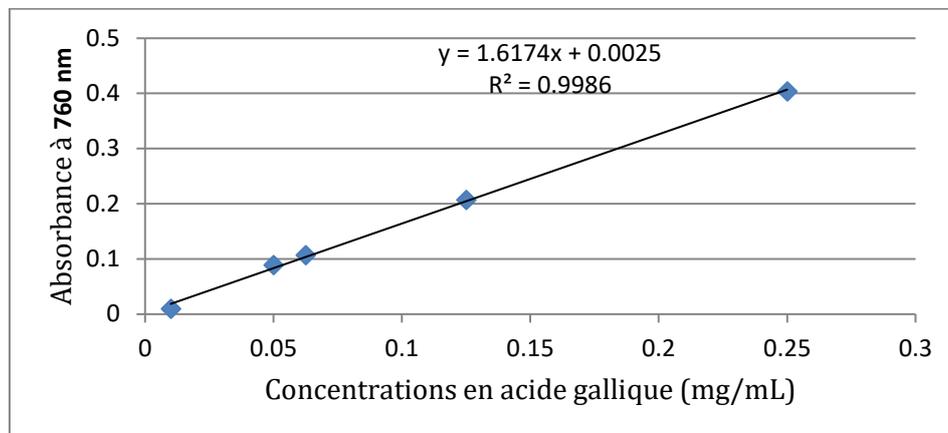
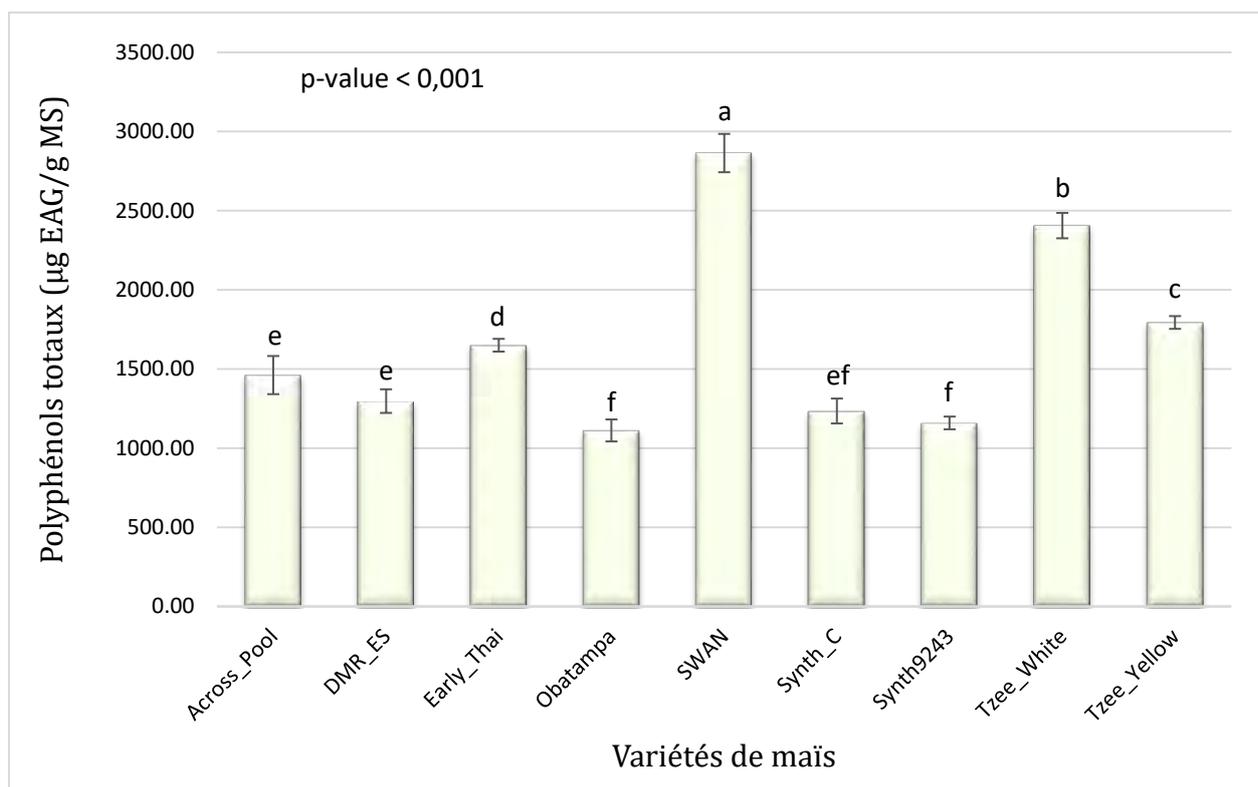


Figure 35 : Courbe d'étalonnage de l'acide gallique

Les teneurs en polyphénols totaux des grains des différentes variétés de maïs varient de façon hautement significative ($p\text{-value} < 0,001$). Des valeurs allant de $1111,94 \pm 69,50$ (Obatampa) à $2864,16 \pm 121,00 \mu\text{g EAG.g}^{-1} \text{ MS}$ (SWAN) sont enregistrées suivant la variété. Les concentrations les plus élevées en polyphénols sont obtenues avec les grains des variétés SWAN ($2864,16 \pm 121,00 \mu\text{g EAG.g}^{-1} \text{ MS}$) et Tzee-White ($2405,85 \pm 80,14 \mu\text{g EAG.g}^{-1} \text{ MS}$). Les concentrations en composés phénoliques de ces dernières font le double de celles des variétés Synth-9243 ($1159,28 \pm 40,16 \mu\text{g EAG.g}^{-1} \text{ MS}$), Synth-C ($1234,68 \pm 78,66 \mu\text{g EAG.g}^{-1} \text{ MS}$) et Obatampa ($1111,94 \pm 69,50 \mu\text{g EAG.g}^{-1} \text{ MS}$).

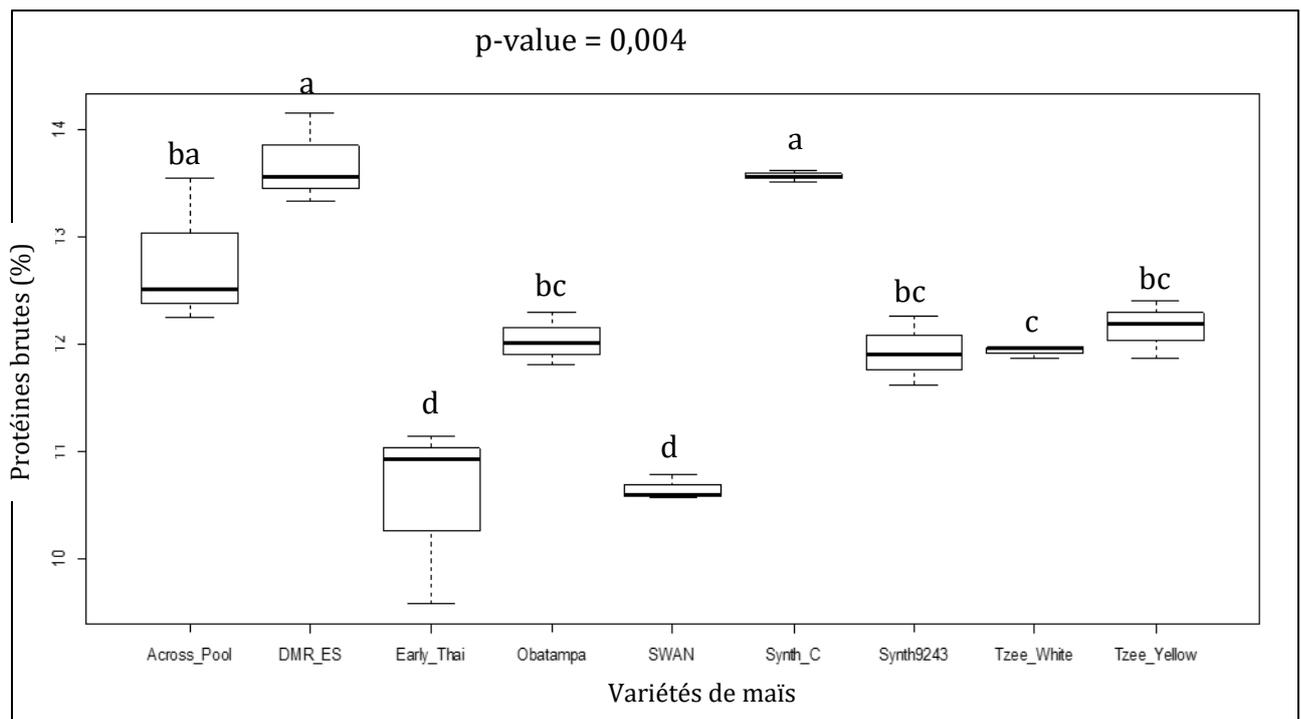


Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre les variétés à $\alpha = 0,05$ lors du test de Tukey après le test ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 36 : Teneurs en polyphénols totaux des différentes variétés de maïs

III.2.2.3 Protéines

Le résultat de la quantification des protéines brutes des grains (Figure 37) révèle des variations significatives ($p\text{-value} = 0,004$) des teneurs en protéines entre les variétés. Les grains des variétés étudiés contiennent en moyennes des valeurs allant de $10,54 \pm 0,85$ à $13,69 \pm 0,42$ % de protéines. Les quantités de protéines les plus élevées se trouvent dans les grains des variétés DMR-ES ($13,69 \pm 0,42$ %) et Synth-C ($13,57 \pm 0,05$ %). Par contre, les plus petits pourcentages en protéines sont enregistrés avec les grains des variétés Early-Thai ($10,54 \pm 0,85$ %) et SWAN ($10,64 \pm 0,11$ %). Les cinq autres variétés (Synth-9243, Tzee-White, Obatampa, Tzee-Yellow et Across-Pool) ont des quantités moyennes en protéines ($11,93 \pm 0,32$ %, $11,93 \pm 0,06$ %, $12,04 \pm 0,25$ %, $12,15 \pm 0,27$ % et $12,77 \pm 0,69$ % respectivement).

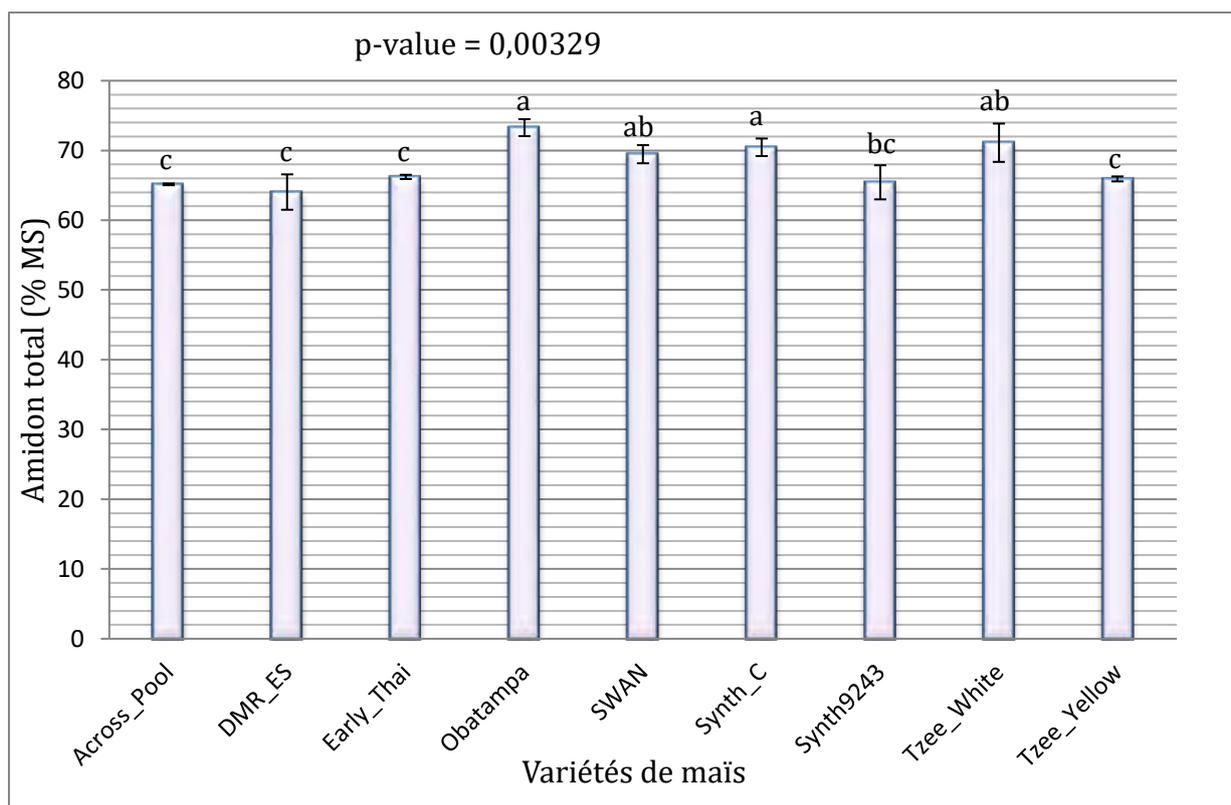


Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre les variétés à $\alpha = 0,05$ lors du test de Tukey après le test ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 37 : Teneurs en protéines des variétés de maïs

III.2.2.4 Amidon total

Les quantités d'amidon total trouvées varient significativement (p -value = 0,003) entre les neuf variétés de maïs évaluées (Figure 38). Nous avons des valeurs moyennes variant de $66,21 \pm 0,30$ à $73,27 \pm 1,22$ % d'amidon dans les grains. Les quantités d'amidon les plus élevées ($> 70\%$) sont trouvées dans les variétés Obatampa, Tzee-White et Synth-C avec $73,27 \pm 1,22$ %, $71,11 \pm 2,75$ % et $70,45 \pm 1,26$ % d'amidon respectivement. La variété DMR-ES a enregistré la plus petite teneur en amidon ($64,04 \pm 2,54$ %), suivi d'Across-Pool ($65,15 \pm 0,12$ %), de Synth-9243 ($65,43 \pm 2,44$ %), de Tzee-Yellow ($65,92 \pm 0,35$ %), d'Early-Thaï ($66,21 \pm 0,30$ %) et enfin de SWAN ($69,46 \pm 1,30$ %).



Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre les variétés à $\alpha = 0,05$ lors du test de Tukey après le test ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 38 : Teneur en amidon total des variétés de maïs

III.2.2.5 Quantité d'amylose dans l'amidon (Amylose/Amylopectine)

Les quantités d'amylose dans l'amidon total des grains sont déterminées à partir de l'équation de la régression linéaire ($y = 0,0276 x + 0,2508$; avec $y =$ absorbance et $x =$ quantité de l'amylose) de la courbe standard megazyme (Figure 39). La mesure de la densité optique (D.O) étant directement proportionnelle à la teneur en amylose (pas de facteur de correction), la quantité d'amylose dans l'amidon est calculée avec l'équation de l'étalon susmentionnée et exprimée en pourcentage.

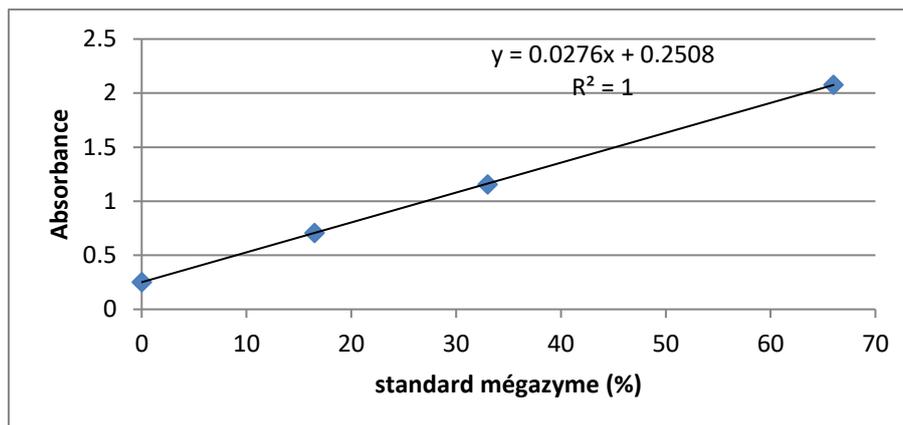
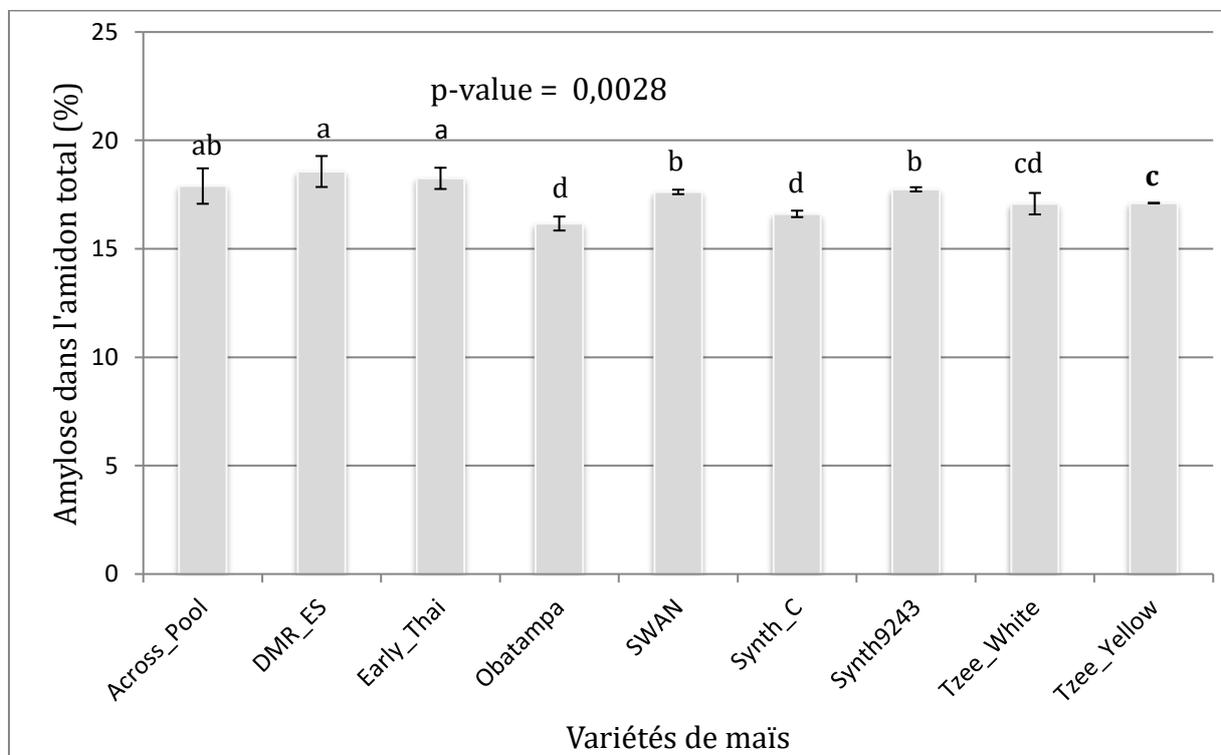


Figure 39 : Courbe d'étalonnage de standard megazyme

Les quantités d'amylose obtenues dans l'amidon total des différentes variétés de maïs (Figure 40) varient significativement (p -value = 0,0028) de $16,17 \pm 0,32$ à $18,57 \pm 0,71\%$. Les variétés les plus riches en amylose dans cette étude sont DMR-ES ($18,57 \pm 0,71\%$ d'amylose) et Early-Thai ($18,25 \pm 0,49\%$ d'amylose). Par contre, Obatampa et Synth-C présentent les plus petites teneurs en amylose ($16,17 \pm 0,32$ et $16,61 \pm 0,15$ % respectivement). Les autres variétés (Tzee-White, Tzee-Yellow, SWAN, Synth-9243 et Across-Pool) ont des teneurs qui tournent autour de 17% d'amylose ($17,08 \pm 0,49\%$, $17,11 \pm 0,01\%$, $17,62 \pm 0,1\%$, $17,74 \pm 0,10\%$ et $17,89 \pm 0,82\%$ respectivement).

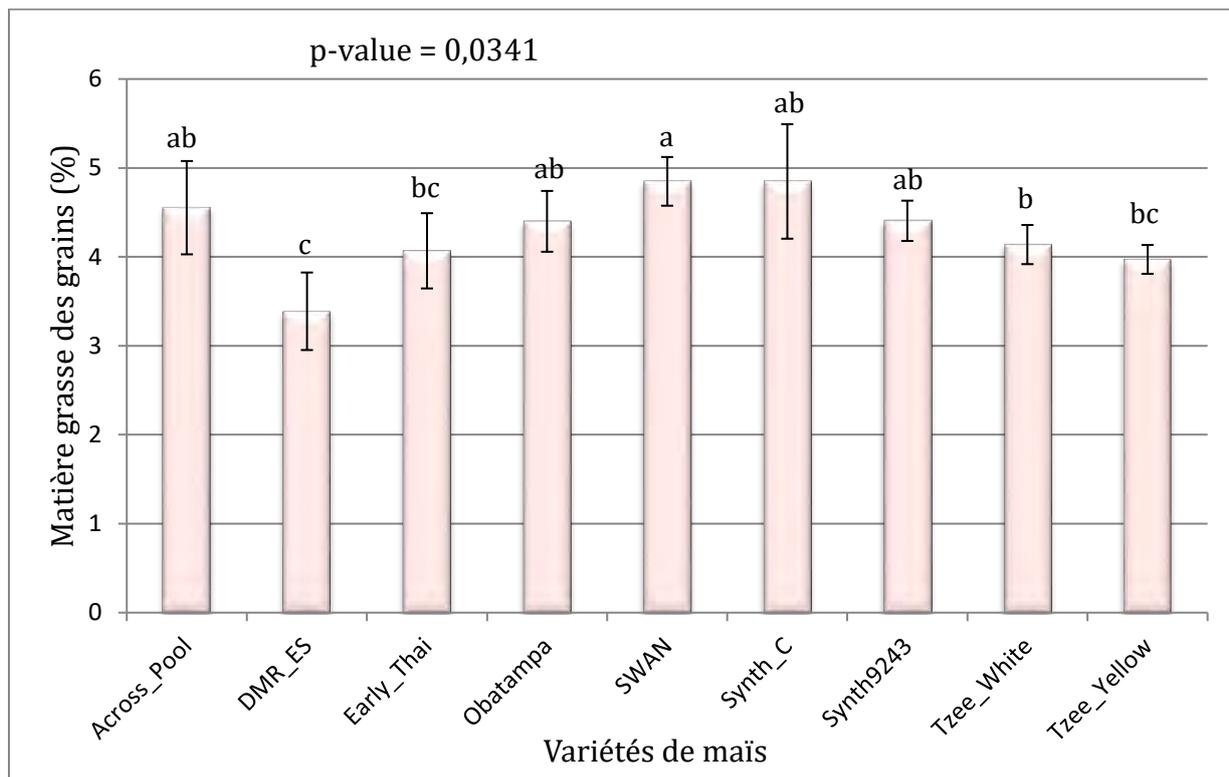


Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre les variétés à $\alpha = 0,05$ lors du test de Tukey après le test ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 40 : Teneur en amylose des amidons des variétés de maïs

III.2.2.6 Matières grasses / teneurs en huiles

Le résultat de l'analyse montre une variation significative (p -value = 0,034) des teneurs en matières grasses des grains des différentes variétés de maïs évaluées (Figure 41). Des valeurs allant de $3,39 \pm 0,44$ (DMR-ES) à $4,85 \pm 0,64$ % (SWAN et Synth-C) de matières grasses sont enregistrées selon les variétés. La variabilité en matières grasses des grains bien que significative, n'est pas très marquée entre les neuf variétés analysées.



Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre les variétés à $\alpha = 0,05$ lors du test de Tukey après le test ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 41 : Teneurs en matières grasses (huiles) des variétés de maïs

III.2.2.7 Acides gras constitutifs des matières grasses des grains

L'analyse des matières grasses par GC-FID montre, en référence du témoin eau (*voir annexe 1a*), dix pics d'acides gras avec des temps de rétention différents dans le chromatogramme de l'échantillon (Figure 42). Ces pics sont identifiés sur la base de leurs temps de rétention comparés à ceux obtenus au préalable avec la solution standards (*voir annexe 1b*). Sur la base du rapport de pourcentage normalisé (*voir annexe 1d*), les esters méthyliques d'acides gras sont caractérisés. Nous avons identifié l'acide palmitique (C16: 0) avec une teneur variant de $14,59 \pm 0,04$ à $15,88 \pm 0,05$ %, l'acide palmitoléique (C16: 1) avec une différence non significative entre les variétés (p -value = 0,0546).

L'acide stéarique (C18: 0) avec une teneur qui varie de $2,19\pm 0,01$ à $3,09\pm 0,07\%$, l'acide oléique (C18: 1n9c) avec une teneur qui varie de $33,89\pm 0,04$ à $28,92\pm 0,06 \%$, l'acide élaïdique (C18: 1n9t) qui varie de $0,66\pm 0,00$ à $0,06\pm 0,01\%$, l'acide linoléique (C18: 2n6c) qui varie de $44,42\pm 0,09$ à $49,72\pm 0,08\%$, l'acide γ-linolénique (C18: 3n6) qui varie de $1,02\pm 0,01$ à $0,90\pm 0,00\%$, l'acide arachidique (C20: 0) qui varie de $0,55\pm 0,00$ à $0,76\pm 0,01\%$, l'acide cis-11-eicosénoïque (C20: 1n9) qui varie de $0,30\pm 0,04$ à $0,36\pm 0,03\%$ et enfin de l'acide behénique (C22: 0) qui varie de $0,18\pm 0,00$ à $0,26\pm 0,00 \%$ (Tableau 13).

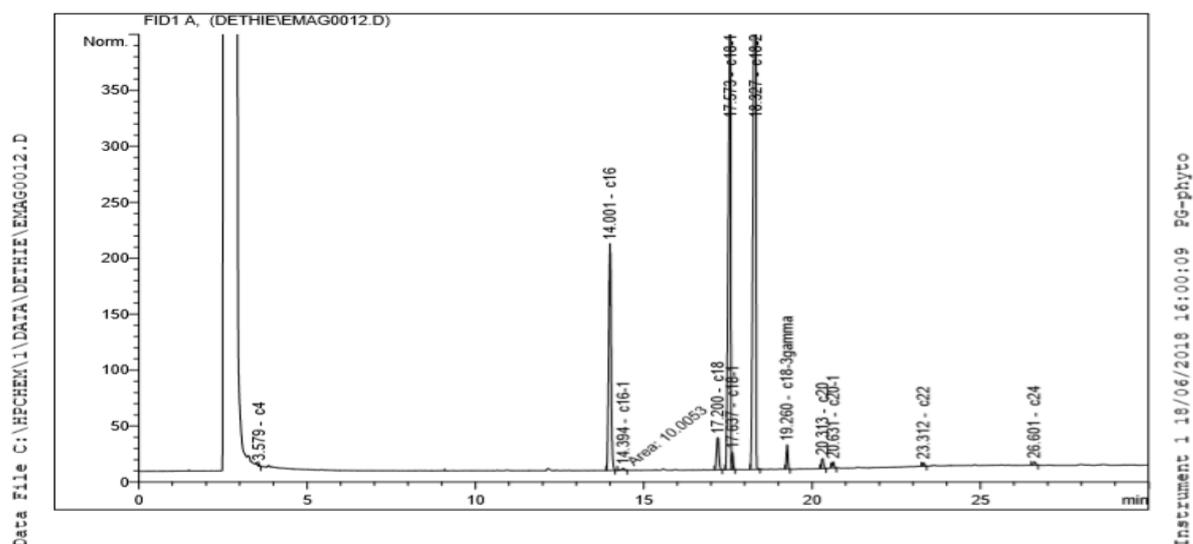


Figure 42 : Chromatogramme des acides gras

Tableau 13 : Composition en acides gras des matières grasses de la farine de maïs (%)

Variétés	C ₁₆	C ₁₆₋₁	C ₁₈	C _{18-1n9c}	C _{18-1n9t}	C _{18-2n6c}	C _{18-3n6}	C ₂₀	C _{20-1n9}	C ₂₂
<i>Across-Pool</i>	15,74±0,05 ^b	0,17±0,01 ^b	2,91±0,01 ^{bc}	33,89±0,04 ^g	0,57±0,01 ^c	44,42±0,09 ^a	0,91±0,00 ^a	0,72±0,00 ^c	0,36±0,01 ^d	0,24±0,00 ^{de}
<i>DMR-ES</i>	15,56±0,09 ^c	0,20±0,00 ^c	2,80±0,06 ^b	32,06±0,20 ^d	0,06±0,01 ^a	46,15±0,22 ^c	0,95±0,00 ^b	0,71±0,01 ^c	0,32±0,01 ^b	0,23±0,00 ^{be}
<i>Early-Thai</i>	14,99±0,02 ^f	0,18±0,01 ^b	2,83±0,02 ^b	31,73±0,02 ^c	0,60±0,01 ^d	47,28±0,06 ^e	1,02±0,00 ^e	0,76±0,01 ^e	0,34±0,00 ^c	0,26±0,00 ^f
<i>Obatampa</i>	15,88±0,05 ^a	0,18±0,02 ^{bc}	2,87±0,06 ^{bc}	32,12±0,07 ^d	0,60±0,00 ^d	46,12±0,05 ^c	0,96±0,00 ^b	0,72±0,00 ^c	0,31±0,00 ^a	0,24±0,00 ^{ce}
<i>SWAN</i>	14,59±0,04 ^g	0,14±0,01 ^a	2,96±0,02 ^{cd}	32,49±0,14 ^e	0,56±0,00 ^b	46,91±0,08 ^d	1,01±0,01 ^d	0,74±0,01 ^d	0,35±0,01 ^d	0,25±0,01 ^e
<i>Synth-9243</i>	15,42±0,05 ^d	0,17±0,01 ^b	2,19±0,01 ^a	30,72±0,05 ^b	0,66±0,00 ^e	48,74±0,08 ^f	1,02±0,01 ^{de}	0,55±0,00 ^a	0,32±0,01 ^b	0,18±0,00 ^a
<i>Synth-C</i>	15,77±0,05 ^b	0,17±0,00 ^b	2,89±0,01 ^{bc}	32,16±0,05 ^d	0,56±0,00 ^b	46,28±0,06 ^c	0,91±0,00 ^a	0,71±0,00 ^c	0,33±0,01 ^b	0,22±0,00 ^b
<i>Tzee-White</i>	15,51±0,03 ^d	0,18±0,01 ^b	2,96±0,05 ^c	33,22±0,05 ^f	0,60±0,00 ^d	45,36±0,06 ^b	0,90±0,00 ^a	0,72±0,01 ^c	0,31±0,01 ^a	0,23±0,00 ^{bcd}
<i>Tzee-Yellow</i>	15,24±0,02 ^e	0,20±0,01 ^c	3,09±0,07 ^d	28,92±0,06 ^a	0,61±0,02 ^d	49,72±0,08 ^g	0,99±0,01 ^c	0,67±0,00 ^b	0,30±0,01 ^a	0,23±0,01 ^{bd}
<i>p-values</i>	< 0,001	0,0546	< 0,001	< 0,001	0,00919	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,0288	< 0,001

Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre variétés à alpha = 0,05 lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

C₁₆ = acide palmitique ; C₁₆₋₁ = acide palmitoléique ; C₁₈ = acide stéarique ; C_{18-1n9c} = acide oléique ; C_{18-1n9t} = acide élaidique ; C_{18-2n6c} = acide linoléique ; C_{18-3n6} = acide γ-linolénique ; C₂₀ = acide arachidique ; C_{20-1n9} = acide cis-11-eicosénoïque ; C₂₂ = acide behénique

III.2.2.8 Teneurs en acides férulique et para-coumarique du grain

Les molécules de la solution injectée dans la colonne sont séparées et retenues à des durées dépendantes de leurs affinités avec la phase stationnaire, au bout desquelles elles arrivent dans un système de détection (signal) qui les traduit sous forme de pics (spectres). Les aires de ces pics sont proportionnelles avec l'intensité du signal, qui traduit la concentration de la molécule dans la solution. Les spectres de l'acide férulique et de l'acide p-coumarique (Figure 43) enregistrés à trois longueurs d'ondes (290, 310 et 320 nm) permettent d'identifier la longueur d'onde d'absorption maximale (λ_{max}) et le temps de rétention (Tr) de chacun des acides. Le résultat révèle un temps de rétention de 15,287 min (Tr : ~15 min) pour l'acide férulique et de 16,367 min (Tr : ~16 min) pour l'acide p-coumarique. Ces Tr sont utilisés pour l'identification des pics de ces acides dans le chromatogramme obtenu de l'analyse des extraits du maïs. Dans le chromatogramme de l'étalon, nous distinguons bien 3 pics (solvant, acide férulique et acide p-coumarique) et deux petits pics qui désignent les impuretés de l'acide férulique et de l'acide p-coumarique, respectivement. Le premier pic appelé front de solvant, indique le temps T_0 ou T_{mort} que met le solvant pour arriver au système de détection.

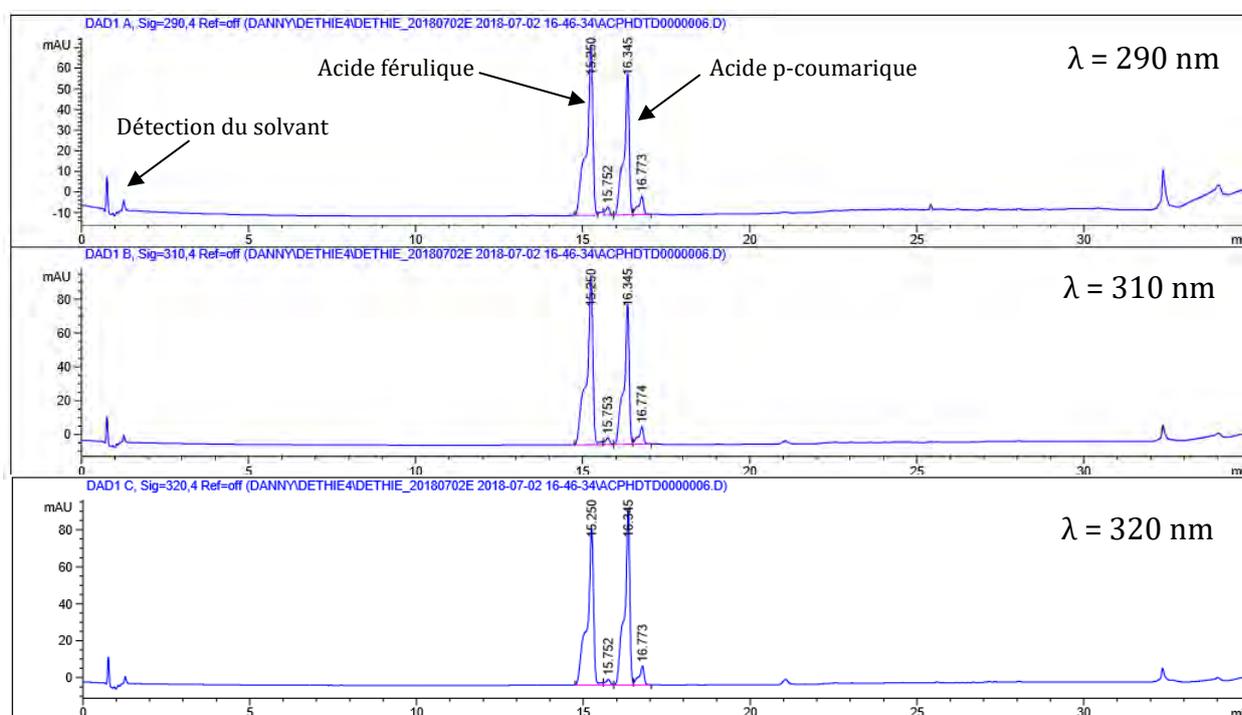


Figure 43 : Chromatogramme du mélange d'acides férulique et p-coumarique

III.2.2.8.1 Acide férulique

Les aires des pics (Figure 44a) sont comparées en vue d'identifier la longueur d'onde qui correspond au maximum d'absorbance de l'acide férulique. Le résultat montre un maximum d'absorbance de l'acide férulique à $\lambda = 310$ nm, pour toutes les concentrations utilisées. Ce résultat concorde avec celui d'Akin (1995). Ainsi, nous avons utilisé le résultat généré par cette longueur d'onde ($\lambda_{\max} = 310$) pour établir la courbe d'étalonnage (Figure 44b) avec laquelle les teneurs en acide férulique des extraits de maïs sont évaluées. Cet étalonnage est réalisé dans les mêmes conditions que les essais. L'équation de la courbe d'étalonnage ($y = 6512x + 24,02$) est utilisée pour déterminer les concentrations en acide férulique des extraits. Ces concentrations sont multipliées par un facteur de conversion ($F = 0,1\text{g/ml}$; poids de maïs 1 g + 10 ml MeOH) afin d'avoir les teneurs en acide férulique des grains, exprimées en microgrammes par 100 grammes de matière sèche de maïs.

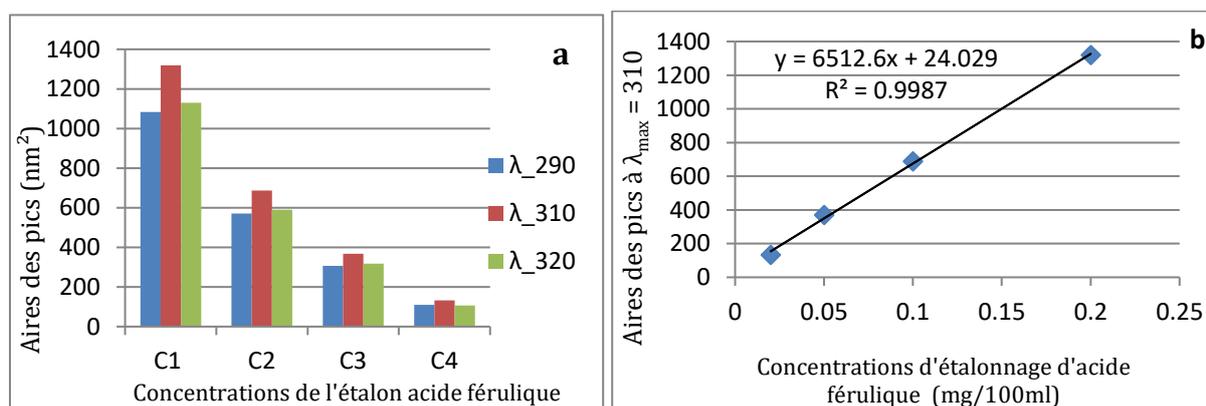
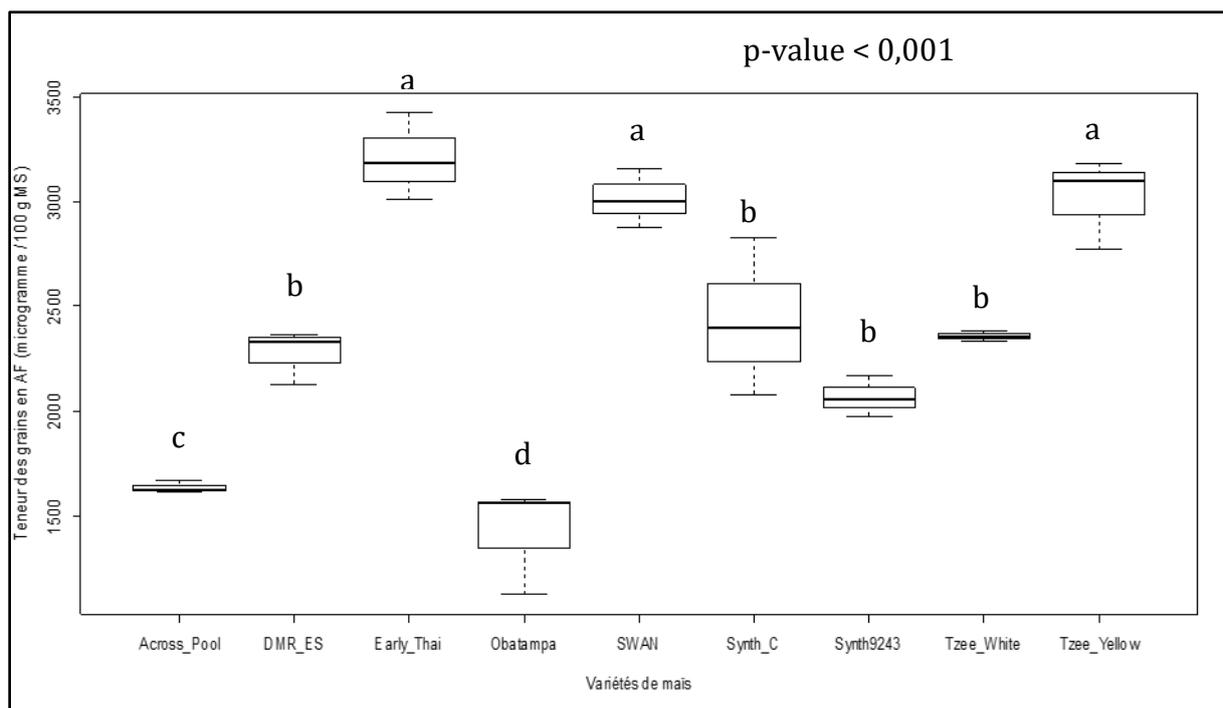


Figure 44 : Absorbances (a) et courbe d'étalonnage à $\lambda_{\max} = 310$ (b) de l'acide férulique

Le chromatogramme des extraits de maïs (*voir annexe 2*) indique des aires spectrales d'acide férulique largement majoritaires. La comparaison des teneurs moyennes en acide férulique des différentes variétés de maïs (Figure 45) révèle une différence hautement significative ($p\text{-value} < 0,001$). Les variétés Early-Thaï, Tzee-Yellow et SWAN contiennent les quantités d'acide férulique les plus fortes, avec $3205,06 \pm 206,73$, $3016,90 \pm 216,91$ et $3011,59 \pm 137,39$ $\mu\text{g}/100\text{g MS}$, respectivement. Les quantités d'acide férulique les plus petites sont enregistrées avec les variétés Obatampa ($1421,09 \pm 256,17$ $\mu\text{g}/100\text{g MS}$), Across-Pool ($1637,27 \pm 28,00$ $\mu\text{g}/100\text{g MS}$) et Synth-9243 ($2066,06 \pm 94,59$ $\mu\text{g}/100\text{g MS}$). Les variétés Synth-C ($2432,30 \pm 376,33$ $\mu\text{g}/100\text{g MS}$), Tzee-White ($2357,37 \pm 23,42$ $\mu\text{g}/100\text{g MS}$) et DMR-ES ($2275,51 \pm 127,75$ $\mu\text{g}/100\text{g MS}$) ont des quantités d'acide férulique intermédiaires par rapport aux deux groupes cités précédemment.



Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre variétés à $\alpha = 0,05$ lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 45 : Teneur en acide férulique des variétés de maïs

III.2.2.8.2 Acide p-coumarique

Quant à l'acide p-coumarique, la comparaison des aires de ses spectres (Figure 46a), enregistrés aux trois longueurs d'onde citées précédemment, indique une absorbance maximale à $\lambda = 320$ nm. Ce résultat conforte les suggestions d'Akin (1995) sur le choix de la longueur d'onde pour la quantification de l'acide p-coumarique par HPLC. Par conséquent, le résultat obtenu par cette longueur d'onde ($\lambda_{\max} = 320$ nm) est utilisé dans nos analyses pour établir la courbe d'étalonnage (Figure 46b), à partir de laquelle les teneurs en acide p-coumarique des extraits de maïs sont évaluées. L'équation de la courbe d'étalonnage ($y = 5238x + 14,79$) est utilisée pour obtenir les concentrations en acide p-coumarique des extraits. Ces concentrations sont multipliées au facteur de conversion ($F = 0,1\text{g/ml}$; poids de maïs 1 g + 10 ml MeOH) afin d'avoir les teneurs des grains en acide p-coumarique, exprimées en microgrammes par 100 grammes de matière sèche de maïs.

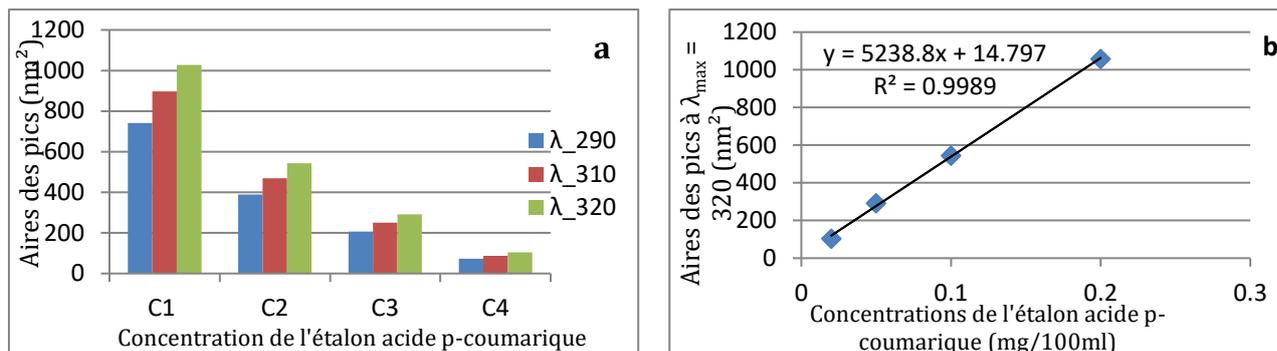
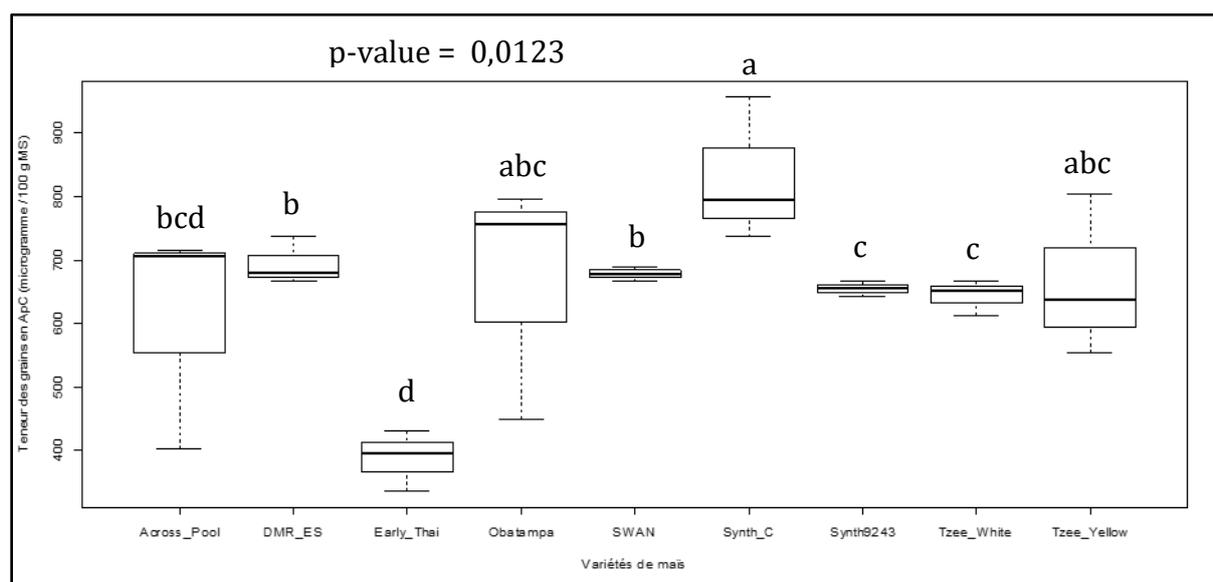


Figure 46 : Absorbances (a) et courbe d'étalonnage à $\lambda_{\max} = 320$ (b) de l'acide p-coumarique

Les aires des spectres issus de l'analyse des échantillons de maïs par HPLC (*Annexe 1*) nous permettent d'évaluer les quantités d'acide p-coumarique des variétés. Les teneurs moyennes en acide p-coumarique des différentes variétés de maïs (Figure 47) présentent une différence significative (p -value = 0,0123). L'acide p-coumarique mesuré dans les échantillons varie entre $387,06 \pm 47,59$ et $829,25 \pm 113,47$ $\mu\text{g}/100$ g MS de maïs. La variété Early-Thaï est celle qui contient le moins d'acide p-coumarique, soit $387,06 \pm 47,59$ $\mu\text{g}/100$ g MS. Inversement, la variété Synth-C est la plus riche en acide p-coumarique ($829,25 \pm 113,47$ $\mu\text{g}/100$ g MS). Les variétés Across-Pool, Tzee-White, Synth-9243, Tzee-Yellow, Obatampa, SWAN et DMR_ES ont des teneurs en acide p-coumarique voisines, soient $607,64 \pm 177,87$, $643,67 \pm 27,03$, $654,47 \pm 11,60$, $664,38 \pm 127,22$, $667,18 \pm 189,31$, $677,39 \pm 12,04$ et $693,84 \pm 37,48$ $\mu\text{g}/100$ g MS, respectivement.



Les lettres a, b, c,... désignent des écarts de moyennes deux à deux entre variétés à $\alpha = 0,05$ lors des tests de Tukey après les tests ANOVA. Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Figure 47 : Teneur en acide p-coumarique des variétés de maïs

III.2.2.9 Matrice de corrélation des paramètres biochimiques

Le résultat de l'analyse de liaisons entre les paramètres biochimiques des grains de maïs (Tableau 14) indique de fortes corrélations négatives de l'acide palmitique avec la teneur en eau des grains ($\rho = -0,660$; $p_{(\rho)} = 0,0002$), avec la teneur en acide férulique des polyphénols ($\rho = -0,770$; $p_{(\rho)} < 0,0001$), et positives avec la teneur des grains en protéines ($\rho = 0,639$; $p_{(\rho)} = 0,0003$). Des corrélations positives sont notées entre la teneur en protéines et la teneur en acide p-coumarique ($\rho = 0,521$; $p_{(\rho)} = 0,0053$) et entre l'acide férulique et la teneur en eau des grains ($\rho = 0,545$; $p_{(\rho)} = 0,0033$).

Tableau 14 : Matrice de corrélations des paramètres biochimiques du maïs

Variabes	HR	Amidon	Amylose	PPT	Proteines	AF	ApC	MG	Ac_Pal
HR	1								
Amidon	-0,331.	1							
Amylose	0,364.	-0,749***	1						
PPT	0,419*	-0,015.	0,180.	1					
Proteines	-0,352.	-0,216.	-0,118.	-0,472*	1				
AF	0,545**	-0,029.	0,262.	0,673***	-0,379.	1			
ApC	-0,161.	0,126.	-0,362.	-0,245.	0,521**	-0,221.	1		
MG	-0,055.	0,355.	-0,279.	-0,030.	-0,098.	-0,096.	0,076.	1	
Ac_Pal	-0,660***	0,236.	-0,462*	-0,661***	0,639***	-0,770***	0,438*	0,085.	1

" * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif ; "." non significatif

HR = Teneur en eau des grains, **Amidon** = Teneur en amidon des grains, **Amylose** = Teneur en amylose de l'amidon des grains, **PPT** = Teneur en polyphénols des grains, **Protéines** = Teneur en protéines des grains, **AF** = Teneur en acide férulique dans les polyphénols des grains, **ApC** = Proportion en acide palmitique dans acides gras des grains, **MG** = Teneur en matière grasse des grains, **Ac_Pal** = Teneur en acide palmitique des acides gras des grains.

III.3 Matrice de corrélation entre paramètres morpho-physiques et biochimiques

Les corrélations binaires entre les paramètres morpho-physiques et biochimiques (Tableau 15) se révèlent hautement significatives. La dureté des grains augmente avec la teneur en polyphénols ($\rho = 0,487$; $p_{(\rho)} = 0,01$) et particulièrement avec l'acide férulique ($\rho = 0,698$; $p_{(\rho)} < 0,001$) et est négativement corrélée avec la teneur en acide palmitique ($\rho = -0,818$; $p_{(\rho)} < 0,001$) des grains. La teneur en polyphénols est fortement et positivement corrélée avec la pureté de la couleur ($\rho = 0,684$; $p_{(\rho)} < 0,001$) des grains. La teneur en acide palmitique est corrélée très fortement et positivement avec la clarté des grains ($\rho = 0,830$; $p_{(\rho)} < 0,001$). Le poids des grains est positivement et fortement corrélé à la teneur en matière grasse des grains ($\rho = 0,626$; $p_{(\rho)} = 0,0005$).

Tableau 15 : Matrice de corrélations des paramètres morpho-physiques et biochimiques du maïs

Variables	HR	Amidon	Amylose	PPT	Proteines	AF	ApC	MG	Ac_Pal	L*	a*	b*	H	ΔE	ΔC	Volume	Poids	Densite	Durete	
HR	1																			
Amidon	-0,331.	1																		
Amylose	0,364.	-0,749***	1																	
PPT	0,419*	-0,015.	0,180.	1																
Proteines	-0,352.	-0,216.	-0,118.	-0,472*	1															
AF	0,545**	-0,029.	0,262.	0,673***	-0,379.	1														
ApC	-0,161.	0,126.	-0,362.	-0,245.	0,521**	-0,221.	1													
MG	-0,055.	0,355.	-0,279.	-0,030.	-0,098.	-0,096.	0,076.	1												
Ac_Pal	-0,660***	0,236.	-0,462*	-0,661***	0,639***	-0,770***	0,438*	0,085.	1											
L*	-0,639***	0,043.	-0,112.	-0,453*	0,485*	-0,747***	0,217.	-0,107.	0,830***	1										
a*	0,563**	0,061.	0,117.	0,541**	-0,605***	0,787***	-0,338.	0,070.	-0,883***	-0,958***	1									
b*	0,528**	0,156.	0,054.	0,687***	-0,446*	0,820***	-0,297.	-0,181.	-0,689***	-0,698***	0,757***	1								
H	0,613***	0,040.	0,113.	0,474*	-0,517**	0,793***	-0,217.	0,137.	-0,857***	-0,974***	0,970***	0,695***	1							
ΔE	0,120.	0,170.	0,064.	0,577**	-0,436*	0,399*	-0,308.	-0,323.	-0,253.	-0,021.	0,198.	0,589**	0,045.	1						
ΔC	0,535**	0,165.	0,071.	0,684***	-0,457*	0,822***	-0,314.	-0,167.	-0,709***	-0,715***	0,779***	0,997***	0,717***	0,572**	1					
Volume	-0,327.	0,361.	-0,400*	-0,256.	0,076.	-0,226.	0,183.	0,564**	0,386*	0,170.	-0,176.	-0,280.	-0,158.	-0,016.	-0,286.	1				
Poids	-0,184.	0,420*	-0,386*	-0,116.	-0,091.	-0,093.	0,310.	0,626***	0,261.	0,041.	-0,065.	-0,159.	-0,015.	0,031.	-0,172.	0,904***	1			
Densite	0,118.	0,051.	0,095.	0,175.	-0,353.	0,020.	0,149.	0,003.	-0,183.	-0,205.	0,170.	0,121.	0,182.	-0,009.	0,130.	-0,060.	0,154.	1		
Durete	0,769***	-0,260.	0,339.	0,487*	-0,425*	0,698***	-0,164.	0,141.	-0,818***	-0,859***	0,805***	0,533**	0,859***	0,013.	0,545**	-0,162.	-0,003.	0,096.	1	

" * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif ; "." non significatif

HR = Teneur en eau des grains, **Amidon** = Teneur en amidon des grains, **Amylose** = Teneur en amylose de l'amidon des grains, **PPT** = Teneur en polyphénols des grains, **Protéines** = Teneur en protéines des grains, **AF** = Teneur en acide férulique dans les polyphénols des grains, **ApC** = Proportion en acide palmitique dans acides gras des grains, **MG** = Teneur en matière grasse des grains, **Ac_Pal** = Teneur en acide palmitique des acides gras des grains, **L*** = Clarté de la surface du grain, **a*** = degré de couleur rouge à vert, **b*** = degré de couleur jaune à bleu, **H** = angle de teinte ou coordonnées cylindriques de teinte, **ΔE** = intensité des couleurs, **ΔC** = intensité du au chroma ((qui reflète la pureté de la couleur)), **Volume** = Volume moyen d'un grain, **Poids** = Poids moyen d'un grain, **Densite** = Densité moyenne d'un grain, **Duree** = Dureté moyenne d'un grai

III.4 Discussion

Les résultats sur la caractérisation morpho-physique et biochimique des grains des différentes variétés de maïs étudiées sont en concordance avec la majorité des résultats trouvés dans les études antérieures.

Paramètres morpho-physiques des grains

Concernant la taille des grains des différentes variétés de maïs étudiées, nous avons enregistré des volumes moyens individuels des grains qui varient significativement de $124,54 \pm 33,29$ à $183,53 \pm 39,50$ mm³ selon la variété. Ce résultat est similaire à celui obtenu par de Park *et al.* (2000). Les valeurs trouvées dans ce travail concordent aussi avec ceux de Mohamed *et al.* (1993) qui ont évalué le volume individuel des grains de 18 variétés de maïs entre 93 et 129 mm³, de ceux de Haugh *et al.* (1976) enregistrant de volumes individuels des grains entre 86 et 143 mm³ pour 12 variétés et ceux de Karababa (2006) qui ont trouvé des valeurs variant de 73,24 à 125,14 mm³.

Les valeurs moyennes obtenues pour le poids individuel des grains ($0,173 \pm 0,044$ à $0,254 \pm 0,040$ g) sont voisines des valeurs mentionnées dans les travaux antérieurs. Karababa (2006) avait évalué le poids des grains de maïs entre 0,136 à 0,157 g l'unité, Park *et al.* (2000) avaient trouvé des poids individuels des grains entre 0,113 à 0,152 g et Haugh *et al.* (1976) avaient obtenus des valeurs variant de 0,101 à 0,194 g pour chaque grain.

Les densités individuelles des grains des différentes variétés varient de $1,402 \pm 0,157$ à $1,547 \pm 0,135$ g/mm³. Nos résultats concordent avec ceux de Karababa (2006) qui rapporte que la densité individuelle des grains de ses échantillons variaient entre 1,304 et 1,224 g / mm³. Mohamed *et al.* (1993) avaient obtenu des densités de grains comprises entre 1,375 et 1,389 g/mm³.

La dureté des grains de maïs, appréciée par la durée de broyage des grains varie significativement de $14,90 \pm 0,38$ (Obatampa) à $21,53 \pm 0,03$ (SWAN) entre les variétés de maïs étudiées. La durée écoulée pour broyer complètement une prise d'essai de 20 g de maïs indique la dureté des grains de la variété selon Pomeranz *et al.* (1986) et Blandino *et al.* (2010).

Certaines variétés de maïs qui présentent les plus fortes valeurs de L* et les plus petites valeurs de a* (Obatampa, Across-Pool, DMR-ES, Tzee-White, Synth-9243 et Synth-C) se caractérisent par une couleur blanche claire selon les définitions de ces paramètres de couleur (Sandhu *et al.*, 2007). Tandis que les variétés qui enregistrent les plus petites valeurs de L* et les plus fortes valeurs de b* largement supérieures à celles de a* (SWAN, Early-Thai et Tzee-Yellow) révèlent une couleur jaune pure avec un rouge faible qui serait due à la présence d'une grande quantité de caroténoïdes dans leurs grains (Floyd *et al.*, 1995 ; Sandhu *et al.*, 2007). La forte variabilité de la couleur des grains, contrôlée par les gènes des variétés (Zuber & Darrah, 1987 ; Almeida-Rios *et al.*, 2014) serait due à une différence génétique élevée entre les variétés étudiées. La variété Tzee-White enregistrant des valeurs de chroma (ΔC) et de L* supérieures à celles des autres variétés blanches, suggère qu'elle est de couleur blanche plus pure et plus claire (Carbas *et al.*, 2016), suivie de DMR-ES, d'Across-Pool, puis de Synth-C. Sur la base de ces valeurs, Synth-9243 s'est avérée blanc avec la pureté et la clarté les plus faibles. La perception de la couleur des grains de maïs à l'œil humain (mesures subjectives) permet de les différencier mais ne permet pas d'apprécier les caractéristiques réelles de la couleur (mesures objectives de laboratoire). Selon Floyd *et al.* (1995), l'intensité (ΔE) de la couleur (blancs et jaunes) des grains de maïs évaluée dans l'espace chromatique de HunterLab L* a* b* se différencie significativement de l'appréciation des couleurs à l'œil humain (sur une échelle de 1 à 5).

Paramètres biochimiques des grains

L'humidité des grains est enregistrée entre $10,89 \pm 0,03$ % et $11,52 \pm 0,00$ %. Ces valeurs concordent avec celles trouvées par Li *et al.* (1996), Blandino *et al.* (2010) et Deffan *et al.* (2015).

Les teneurs en polyphénols des grains varient significativement de $1111,94 \pm 69,50$ (Obatampa) à $2864,16 \pm 121,00$ $\mu\text{g EAG.g}^{-1}$ MS (SWAN), entrant dans la plage trouvée par la majorité des études antérieures. Arnason *et al.* (1994) ont évalué les polyphénols de 33 variétés mexicaines de maïs entre 1053 à 2563 $\mu\text{g/g}$; Demissie *et al.* (2015) ont obtenu des valeurs allant de $696,3 \pm 71,4$ et $1111,3 \pm 154,5$ $\mu\text{g/g}$ pour 20 variétés de maïs. Ces polyphénols sont composés de quantités d'acide férulique qui varient entre $1421,09 \pm 256,16$ et $3205,06 \pm 206,73$ $\mu\text{g/100g MS}$ selon la variété de maïs. Bily (2003) et Pandey *et al.* (2013) ont trouvé des résultats similaires dans les grains de maïs.

L'acide para-coumarique mesuré dans les échantillons varie entre $387,06 \pm 47,59$ et $829,25 \pm 113,47$ $\mu\text{g}/100\text{g MS}$ de maïs. Nos résultats concordent avec ceux de Ahagnier *et al.* (2003).

Les variétés contiennent des protéines variant de $10,54 \pm 0,85$ à $13,69 \pm 0,42$ %. Les quantités de protéines obtenues dans nos échantillons sont très proches de celles obtenues par Zilic *et al.* (2011), allant de 10,13 à 13,27 % pour 8 variétés hybrides de maïs et de celles de Qamar *et al.* (2016) qui ont estimé entre 11,05 à 12,79% les protéines brutes du maïs collecté auprès de différents instituts de recherche sur le maïs. Nos variétés contiennent plus de protéines que 20 variétés hybrides du CIMMYT² évaluées entre 9 et 10,9 % de protéines par Amen *et al.* (2015), que les 9 variétés évaluées entre 9,8 à 11,0 % de protéines par Arnason *et al.* (1993) ainsi que la majorité des 10 variétés évaluées (7,71 à 14,60 % de protéines) par Ullah *et al.* (2010).

Nous avons des valeurs moyennes d'amidon dans les grains variant de $66,21 \pm 0,30$ à $73,27 \pm 1,22$ %. Ces valeurs sont dans une plage non loin de celles trouvées dans le maïs par Zilic *et al.* (2011) (54,59 à 69,92 % d'amidon) pour 8 variétés hybrides, par Khan *et al.* (2014) (60,38 à 66,31% d'amidon) pour 20 variétés et par Amen *et al.* (2015) (68,6 à 71,2 % d'amidon) pour 10 variétés. La richesse en amidon des grains de maïs de cette étude indique qu'ils constituent une principale ressource énergétique alimentaire. Des grains d'une telle teneur en amidon sont recommandés par les nutritionnistes comme aliment de base (Lullien-Pellerin, 2014).

L'amidon des grains contient des proportions d'amylose variant significativement de $16,17 \pm 0,32$ à $18,57 \pm 0,71$ %. Cette plage de proportion d'amylose dans l'amidon est proche de celles trouvées dans les grains de maïs par Seetharaman *et al.* (2001) (16,1 à 23,3 % d'amylose) pour 35 variétés, par Sandhu *et al.* (2004) (15,3 à 25,1% d'amylose) pour 6 variétés et par Demissie *et al.* (2015) (14,77 à 26,29 % d'amylose) pour 20 variétés.

Les variétés contiennent des matières grasses qui varient de $3,39 \pm 0,44$ à $4,85 \pm 0,64$ % selon la variété. Les études antérieures ont enregistré des valeurs proches de celles obtenues dans cette étude, variant de 3,43 à 4,94 % pour 20 variétés (Demissie *et al.*, 2015), de 3,21 à 7,71% pour 10 variétés (Ullah *et al.*, 2010), de 4,4 à 5,6% pour 20 variétés (Amen *et al.*, 2015) et de 4,16 à 5,76% pour 20 variétés (Khan *et al.*, 2014).

² Centre international d'amélioration du maïs et du blé

L'analyse de ces matières grasses permet d'identifier 10 acides gras que sont les acides palmitique, palmitoléique, stéarique, oléique, élaidique, linoléique, γ -linoléique, arachidique, Cis-11-eicosénoïque et behénique. Ces acides sont enregistrés en proportions similaires de celles trouvées par Park *et al.* (2000), Goffman et Böhme (2001), Lantos *et al.* (2015) et Carrillo *et al.* (2017). La matière grasse des variétés de maïs étudiées est constituée majoritairement d'acide linoléique (44,42 - 49,72%), suivi de l'acide oléique (28,92 - 33,89%) et de l'acide palmitique (14,59 - 15,88%). Cette huile végétale est très utilisée dans l'industrie alimentaire pour sa bonne composition en acides gras.

De façon globale, les résultats de la caractérisation des grains indiquent que les variétés évaluées dans l'étude répondent aux meilleurs critères nutritionnels, biochimiques et physiques définis par la FAO pour le maïs destiné à l'alimentation humaine et animale (Yapi & De, 2017).

Relation entre paramètres morpho-physiques et biochimiques des grains

Les analyses révèlent que certains aspects physiques du grain sont étroitement liés à sa composition biochimique (Tableau 15), comme la dureté des grains avec la teneur en acide férulique ($\rho = 0,698^{***}$), la teneur en polyphénols avec la pureté de la couleur ($\rho = 0,684^{***}$), la teneur en acide palmitique avec la clarté des grains ($\rho = 0,830^{***}$), le volume des grains avec la teneur en matière grasse ($\rho = 0,564^{**}$) des grains. Pour ce qui concerne le premier cas de liaison précitée, en effet l'acide férulique est lié aux parois cellulaires de la couche d'aleurone et du péricarpe par une liaison ester et crée une structuration physique complexe qui augmente la dureté du grain (Arnason *et al.*, 1994 ; Ishii, 1997 ; Bily *et al.*, 2003). Certaines études associent la dureté des grains de maïs à une contribution biochimique de certains constituants tels que les protéines (famille des zéines) et l'amidon total des grains (Lee *et al.*, 2006). Cependant, d'autres études ont mentionné une absence de liaisons entre la teneur en protéines et la dureté du grain. Cette étude trouve une relation inverse entre la teneur en protéines et la dureté du grain. Les propriétés antioxydantes des polyphénols du grain de maïs (Pandey *et al.*, 2013 ; Boz, 2015 ; Zhang *et al.*, 2017) joueraient un grand rôle d'entretien des cellules épidermiques, ce qui peut constituer un facteur qui renforce la pureté de la couleur des grains.

CONCLUSION PARTIELLE

Les caractéristiques morpho-physiques ainsi que la nature et la quantité des composés biochimiques des grains des différentes variétés de maïs homologuées et cultivées au Sénégal sont bien mesurées dans ce travail. Les grains présentent des variations en composés biochimiques et en structuration morpho-physique statistiquement très élevées. Cependant, globalement, les variétés répondent aux critères morpho-physiques, biochimiques et nutritionnels de la FAO pour le maïs destiné à l'alimentation humaine et animale. Les valeurs trouvées concernant leurs différentes caractéristiques sont voisines de celles trouvées pour la majorité des variétés utilisées un peu partout dans les pays producteurs et/ou centres de sélection et de production de semences, en particulier le CIMMYT. Les énormes variations significativement en nutriment, en composition chimique, en structuration morpho-physique d'une variété à l'autre permettent de bien les discriminer. Les caractéristiques des grains les plus citées dans la sensibilité variétale (dureté, teneurs en polyphénols, en acide palmitique, en amylose, etc) varient significativement entre les variétés évaluées. Ces variations seraient à l'origine de la différence des niveaux de sensibilité enregistrée entre les variétés de maïs (Chapitre 1).

**CHAPITRE IV : EFFETS DES CARACTERISTIQUES MORPHO-PHYSIQUES ET
BIOCHIMIQUES DES GRAINS DE MAÏS SUR LA SENSIBILITE VARIETALE**

INTRODUCTION

La résistance de l'hôte fut une des stratégies de lutte contre les prédateurs utilisée depuis le 18^{ième} siècle (Phiogène, 1984). La résistance des grains de maïs aux Coléoptères a été reliée pendant longtemps à des facteurs physiques tels que les spathes, la dureté de l'enveloppe, la dureté du noyau, la taille, la texture du noyau, *etc.* (Eden, 1952 ; Singh & McCain, 1963 ; Vanderschaaf *et al.*, 1969 ; Schoonhoven *et al.*, 1976 ; Gomez *et al.*, 1983 ; Serratos *et al.*, 1987 ; Kossou *et al.*, 1993 ; Eyherabide *et al.*, 1996 ; Robutti *et al.*, 1997). Cependant, certaines variétés de maïs se sont avérées très sensibles aux attaques des insectes malgré une dureté notable de leurs grains (Russell, 1962 ; Dobie, 1977 ; Ivbiljaro, 1981). Ceci révèle que la résistance des grains de maïs aux insectes s'explique plutôt par des interactions complexes entre des facteurs anatomiques, biochimiques et génétiques qui jouent divers rôles d'antibiose et / ou d'antixénose (Bergvinson & García-Lara, 2004 ; Tefera *et al.*, 2016). L'analyse poussée des caractéristiques nutritionnelles majeures du grain de maïs a permis de mettre en évidence le rôle important de différentes molécules dans sa résistance aux attaques des Coléoptères. Ainsi, beaucoup de travaux orientés dans ce sens ont permis de ressortir le rôle des glucides (Singh & McCain, 1963), des protéines (Gomez *et al.*, 1983 ; Dombink-Kurtzman & Bietz, 1993), des acides phénoliques (Classen *et al.*, 1990 ; Arnason *et al.*, 1992 ; Philogène & Arnason, 1995 ; Santiago & Malvar, 2010 ; García-Lara & Bergvinson, 2014), de la teneur de l'amidon en amylose (Peters *et al.*, 1972 ; Dobie, 1973 ; Mendiola-Olaya *et al.*, 2000), de la teneur du grain en acide palmitique (Youn *et al.*, 2012 ; Roy & Barik, 2014), des phagostimulants (Schoonhoven *et al.*, 1976), des composés volatils attractifs (Yamamoto *et al.*, 1975 *in* Serratos *et al.*, 1987) et des stimulants de la ponte (Dobie, 1977) dans la sensibilité variétale. Sur le plan morphologique, la couleur des grains de maïs, déterminée par les pigments dans le péricarpe, la couche d'aleurone, l'endosperme et le scutellum (Wolf *et al.*, 1952), varie considérablement (Watson, 1987) et influe fortement l'acceptabilité alimentaire et d'oviposition de l'insecte.

Ce chapitre a trois objectifs spécifiques :

- **OS1** : Déterminer le rôle des caractéristiques morfo-physiques des grains de maïs sur la sensibilité variétale ;
- **OS2** : Evaluer le rôle des composés biochimiques des grains de maïs sur la sensibilité variétale ;

- **OS3** : Identifier les facteurs clés de la sensibilité des grains aux attaques d'insectes en vue d'une utilisation dans les programmes d'amélioration variétale ;

IV.1 Matériel et méthodes

IV.1.1 Echantillons (données)

Dans ce Chapitre, les données issues des évaluations de performances et de comportements reproductifs des insectes et de la sensibilité des variétés (Chapitre II) ont été corrélées avec celles des caractéristiques morpho-physiques et biochimiques des grains (Chapitre III) en vue de mettre en évidence les mécanismes morpho-physiques et biochimiques impliqués dans la sensibilité variétale.

IV.1.2 Analyses statistiques

Toutes les données (paramètres biologiques des insectes, sensibilité variétale, morpho-physiques et biochimiques des grains) ont été enregistrées sur Excel et traitées avec le logiciel R (versions R-3.0.0 et R-3.4.1, packages ade4, rgl, ggplot2, grid, FactoMineR, devtools, factoextra, mclust, Hmisc, readxl et stats) suivant les recommandations d'Agès (2004) et de Bloomfield (2014). Des tests paramétriques (ANOVA à un facteur et Tukey) et/ou non paramétriques (Kruskal-Wallis et Wilcoxon) ont été réalisés selon la normalité (Shapiro-wilks) et l'homogénéité des variances (Bartlett) des séries de données. Des analyses bivariées, des matrices de corrélations, des Analyses en Composantes Principales (ACP) et des Analyses Factorielles Discriminantes (AFD) ont été effectuées. L'intensité de liaison entre les variables a été appréciée sur la base du coefficient de corrélation rho:

- Si $\rho = 1$ => liaison parfaite
- Si $\rho > 0,8$ => très forte corrélation
- Si $0,5 \leq \rho \leq 0,8$ => forte corrélation
- Si $0,2 \leq \rho < 0,5$ => corrélation moyenne
- Si $\rho < 0,2$ => faible corrélation
- Si $\rho = 0$ => pas de corrélation

La validation du résultat obtenu a été faite suite à un test de significativité de rho suivant deux hypothèses :

- ◆ $H_0 : \rho = 0$
- ◆ $H_1 : \rho \neq 0$

Si la $p\text{-value}_{(\rho)} > 0,05$ on accepte H_0 (c'est-à-dire, la valeur de ρ trouvée n'est pas statistiquement différente de 0).

Si la $p\text{-value}_{(\rho)} < 0,05$ on accepte H_1 (c'est-à-dire la valeur de ρ trouvée est statistiquement différente de 0, donc il existe une liaison entre les deux variables)

Le niveau de significativité de ρ est apprécié en fonction de la valeur de $p\text{-value}_{(\rho)}$ comme suit :

" . "	$P \geq 0,05$	non significative
" * "	$0,05 > P \geq 0,01$	moyennement significative
" ** "	$0,01 > P \geq 0,001$	très significative
" *** "	$P < 0,001$	hautement significative

Etant donné que nous avons d'énormes paramètres, la détermination des variables différenciant significativement la sensibilité des variétés de maïs a été effectuée par des analyses multivariées. Ce sont de genres d'analyses qui visent à structurer et à simplifier des données issues de plusieurs variables sans privilégier l'une d'entre elles en particulier (étude simultanée de plusieurs variables). Parmi les méthodes d'analyses multivariées, des Analyses en Composantes Principales (ACP), complétées avec des Analyses Factorielles Discriminantes (AFD) ont été choisies pour répondre au mieux aux objectifs du travail, au regard des données que nous avons (Agès, 2004 ; Bloomfield, 2014).

IV.1.2.1 Analyses en Composantes Principales (ACP)

C'est une des méthodes de statistique multidimensionnelle dites factorielles, qui fait le résumé le plus pertinent possible d'un grand tableau de données quantitatives initiales. L'ACP est une analyse multivariée descriptive qui permet de décrire sous forme de graphique des variables d'un tableau de mesure. Elle permet de réduire un système complexe de corrélations en un petit nombre de dimensions (ou axes ou facteurs) qui regroupent les variables corrélées entre elles dans le but de visualiser et d'explicitier au mieux un phénomène. A partir des matrices de corrélations, nous avons réalisé des ACP en vue de ressortir les dispersions et les proximités des variables via leurs coordonnées factorielles dans les cercles de corrélations. Plus la variable est proche du cercle, meilleure est la qualité de sa participation à l'interprétation des ACP et des AFD.

- **Choix des dimensions pour la construction des ACP** (nombre q d'axes factoriels): la qualité des interprétations auxquelles conduit l'ACP dépend du choix du nombre de dimensions retenues (q) pour reconstituer les données.

Le choix de ces axes a pour but d'obtenir le maximum d'inertie conservée avec le minimum de facteurs. De nombreux critères de choix pour q ont été proposés dans la littérature (Part d'inertie, Règle de Kaiser, Éboullis des valeurs propres, Diagrammes des composantes en boîtes, Stabilité des sous-espaces,...). Dans cette étude, la Part d'inertie a été utilisée pour choisir le nombre q axes factoriels. Pour ce critère, la qualité globale des représentations est mesurée par la part d'inertie expliquée. La valeur de q est choisie de sorte que cette part d'inertie expliquée soit supérieure à une valeur seuil fixée a priori par l'utilisateur (Agès, 2004). Dans ce travail, 60 % d'inertie a été utilisé comme valeur seuil.

- **Composantes principales (CP)** : une variable est appelée CP pour une dimension quand elle donne un sens à cette dimension, en contribuant fortement à la construction de celle-ci. Autrement, c'est une variable qui a une contribution supérieure à la contribution moyenne des variables de l'ACP ($C_{\text{CONT}_{\text{moy}}} = 1/n \times 100$, avec n = nombre de variables utilisées). Les variables qui avaient une contribution significative ($C_v > C_{\text{CONT}_{\text{moy}}}$) ont été retenues pour l'interprétation des ACP et AFD. L'importance de leurs contributions a été matérialisée par un gradient de couleurs sur l'ACP.

Sur la base des ACP, des AFD ont été effectuées avec les variables dont leurs contributions sont supérieures ou égales à la contribution moyenne (CP retenues dans les ACP).

IV.1.2.2 Analyses Factorielles Discriminantes (AFD)

C'est une méthode factorielle qui permet de faire une représentation graphique associée en vue d'explorer statistiquement des variables quantitatives (paramètres morpho-physique et biochimique des grains), jouant le rôle de variables explicatives et d'une variable qualitative (variété de maïs), jouant le rôle de variable à expliquer. Les nombreuses liaisons entre les variables, mises en évidence par les matrices de corrélations, ne permettent pas une bonne interprétation discriminative de la sensibilité variétale pour les mécanismes impliqués. Ainsi, des analyses discriminatives, telles que les Analyses Factorielles Discriminantes (ou analyses discriminantes descriptives) ont été utilisées pour ressortir les meilleurs indicateurs de sensibilité variétale du maïs.

Les paramètres discriminatifs du niveau de sensibilité des variétés ont été bien mis en évidence dans l'analyse combinée de l'ensemble des variables suivant les différents axes retenus (AFD).

IV.2 Résultats

IV.2.1 Variabilités inter-variétales aux risques d'infestation par *S. zeamaïs*

IV.2.1.1 Liaisons entre les paramètres de sensibilité et morpho-physique

IV.2.1.1.1 Matrice de corrélations entre paramètres physique et de sensibilité

L'analyse des corrélations (Tableau 16) montre que l'effectif des descendants de la première génération (F_1) de *S. zeamaïs* est négativement corrélé à la dureté des grains ($\rho = -0,450$; $p_{(\rho)} = 0,0184$). La dureté des grains est également corrélée négativement aux pertes de poids des grains ($\rho = 0,574$; $p_{(\rho)} = 0,0017$) et à l'indice de susceptibilité des variétés ($\rho = -0,510$; $p_{(\rho)} = 0,0066$).

Tableau 16 : Matrice de corrélations des paramètres de sensibilité et physique

Variables	Eff_ad	Att_G	Perte_PG	IS	Dureté	Densité	Volume	Poids
Eff_ad	1							
Att_G	0,969***	1						
Perte_PG	0,736***	0,762***	1					
IS	0,861***	0,860***	0,843***	1				
Dureté	-0,450*	-0,458*	-0,574**	-0,510**	1			
Densité	-0,085.	-0,057.	-0,264.	-0,092.	0,382*	1		
Volume	0,182.	0,271.	0,304.	0,236.	-0,162.	-0,092.	1	
Poids	0,137.	0,220.	0,179.	0,166.	-0,003.	0,290.	0,904***	1

" * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif ; "." non significatif

Eff_ad = Effectif des adultes émergés, **Att_G** = % de grains attaqués, **Perte_PG** = % de pertes de poids des grains, **IS** = Indice de susceptibilité de Dobie, **Duree** = Dureté moyenne d'un grain, **Densite** = Densité moyenne d'un grain, **Volume** = Volume moyen d'un grain, **Poids** = Poids moyen d'un grain.

IV.2.1.1.2 Matrice de liaisons entre paramètres morphologique et de sensibilité

La matrice de corrélations (Tableau 16) révèle que la clarté du grain (L^*) est positivement liée à l'effectif des descendants de la première génération (F_1) de *S. zeamaïs* ($\rho = 0,465$; $p_{(\rho)} = 0,0145$), aux pourcentages d'attaque ($\rho = 0,418$; $p_{(\rho)} = 0,0301$) et de pertes pondérales ($\rho = 0,480$; $p_{(\rho)} = 0,0114$) et par conséquent, à l'indice de susceptibilité des grains ($\rho = 0,488$; $p_{(\rho)} = 0,0098$). Ce dernier est inversement corrélé aux colorations rouge (a^*) ($\rho = -0,500$; $p_{(\rho)} = 0,0079$) et jaune (b^*) ($\rho = -0,573$; $p_{(\rho)} = 0,0018$), à l'angle de teinte (H) ($\rho = -0,468$; $p_{(\rho)} = 0,0138$) et à la pureté de la couleur (ΔC) ($\rho = -0,571$; $p_{(\rho)} = 0,0019$) des grains. Les pertes de poids des grains sont aussi négativement corrélés aux couleurs rouge (a^*) ($\rho = -0,465$; $p_{(\rho)} = 0,0145$) et jaune (b^*) ($\rho = -0,542$; $p_{(\rho)} = 0,0035$), à l'angle de teinte (H) ($\rho = -0,455$; $p_{(\rho)} = 0,0172$) et à la pureté de la couleur (ΔC) ($\rho = -0,522$; $p_{(\rho)} = 0,0052$) des grains.

Tableau 17 : Matrice de corrélations des paramètres de sensibilité et morphologique

Variables	Eff_ad	Att_G	Perte_PG	IS	L*	a*	b*	H	ΔE	ΔC
Eff_ad	1									
Att_G	0,969***	1								
Perte_PG	0,736***	0,762***	1							
IS	0,861***	0,860***	0,843***	1						
L*	0,465*	0,418*	0,480*	0,488**	1					
a*	-0,440*	-0,367.	-0,465*	-0,500**	-0,958***	1				
b*	-0,496**	-0,442*	-0,542**	-0,573**	-0,698***	0,757***	1			
H	-0,404*	-0,360.	-0,455*	-0,468*	-0,974***	0,970***	0,695***	1		
ΔE	-0,266.	-0,194.	-0,290.	-0,330.	-0,021.	0,198.	0,589**	0,045.	1	
ΔC	-0,491**	-0,437*	-0,522**	-0,571**	-0,715***	0,779***	0,997***	0,717***	0,572**	1

" * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif ; "." non significatif

Eff_ad = Effectif des adultes émergés, **Att_G** = % de grains attaqués, **Perte_PG** = % de pertes de poids des grains, **IS** = Indice de susceptibilité de Dobie, **L*** = Clarté de la surface du grain (0 à 100 = sombre à clair), **a*** = degré de couleur rouge à vert (+ a* = plus de rouge, -a* = plus de vert), **b*** = degré de couleur jaune à bleu (+ b* = plus de jaune, -b* = plus de bleu), **H** = angle de teinte ou coordonnées cylindriques de teinte, **ΔE** = intensité des couleurs, **ΔC** = intensité du au chroma (qui reflète la pureté de la couleur)

IV.2.1.1.3 Analyses en Composantes Principales (ACP)

Le graphique des valeurs propres des ACP sur les paramètres physiques et de sensibilité des grains (Figure 48A), suggère de retenir les deux premiers axes ($q = 2$) qui expliquent respectivement 52,2 % et 23,4 % de l'information générale que contiennent les huit (08) variables utilisées (Tableau 16). Ces deux dimensions contiennent une inertie totale de 84,6 %, suffisamment élevée pour garantir une interprétation fiable des variables physiques sur la sensibilité des variétés de maïs. Les composantes principales sont colorées (violet à vert sur l'ACP) et retenues selon leurs contributions significatives dans la construction des deux dimensions. Certaines d'entre-elles participent significativement à la construction de la première dimension (Dureté : Cont_1 = 12,75 % ; Eff_ad : Cont_1 = 18,92 % ; Perte_PG : Cont_1 = 19,27 % ; Att_G : Cont_1 = 19,83 et IS : Cont_1 = 21,23 %) et les autres à celle de la deuxième dimension (Volume : Cont_2 = 41,55 % et Poids : Cont_2 = 49,15 %).

Le cercle de corrélations formé par les deux dimensions permet de regrouper suivant la première dimension (droite), un groupe de variables en très forte corrélation positive (Tableau 16). Suivant cet axe nous avons l'effectif des émergences F_1 (Eff_ad), le % d'attaque (Att_G), le % de pertes pondérales des grains (Perte_PG) et l'indice de susceptibilité (IS). A l'inverse, en corrélations négatives avec les variables du groupe précédent, se trouve un deuxième groupe constitué de la densité et de la dureté des grains.

Dans la partie inférieure de la deuxième dimension, se trouve le volume et le poids des grains, deux variables fortement corrélées entre elles (Tableau 16).

Les deux premières dimensions du graphique des valeurs propres de l'ACP sur les paramètres morphologiques et de sensibilité (Figure 48B) représentent une inertie totale de 85 %, suffisante pour garantir une bonne interprétation des variables morphologiques du grain sur la sensibilité variétale. Les composantes principales (CP) sont colorées (bleu à vert sur l'ACP) et retenues selon leurs contributions significatives dans la construction des deux dimensions. La première dimension qui explique 66,7 % de la sensibilité, est construite par des CP que sont IS (Cont_1 = 10,29 %), H (Cont_1 = 12,20 %), a* (Cont_1 = 12,83 %), b* (Cont_1 = 13,03 %) et ΔC (Cont_1 = 13,15 %). La deuxième dimension qui porte 18,3 % de l'inertie totale est construite à partir des contributions des CP comme L* (Cont_2 = 15,20 %), Eff_ad (Cont_2 = 18,09 %) et Att_G (Cont_2 = 18,78 %). Ces deux dimensions forment un cercle de corrélations regroupant certaines variables de part et d'autre de la première dimension (IS, Eff_ad, Att_G, Perte_PG à droite et H, a*, b*, ΔC à gauche) et d'autres autour de la deuxième dimension (L* et ΔE dans la partie inférieure et L* Eff_ad et Att_G dans la partie supérieure).

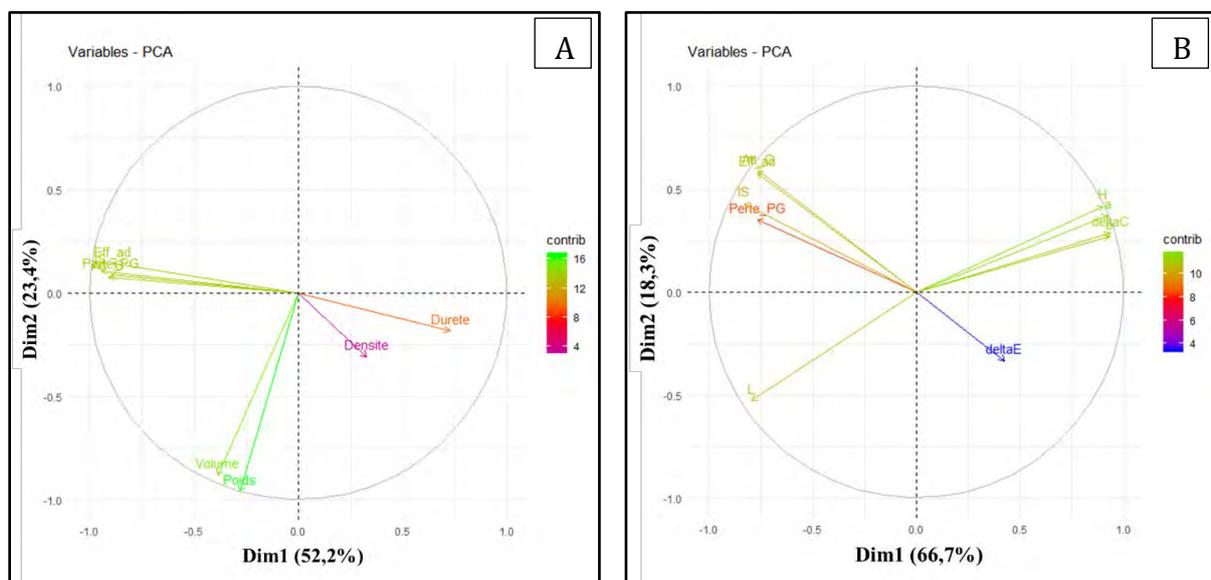


Figure 48 : ACP des paramètres de sensibilité à *S. zeamais* et morphophysiques des grains

IV.2.1.1.4 Analyses Factorielles Discriminantes (AFD).

Le résultat de la représentation conjointe des variables physiques et des variétés indique que 52,2 % (Figure 49A) du pouvoir discriminatoire de l'AFD est porté par le 1^{er} axe.

La projection des variétés sur cet axe permet de constater une opposition entre le groupe constitué des variétés Obatampa, Synth-C et Synth-9243 et la variété SWAN. Le groupe de variétés précité est caractérisé d'une part, par un indice de susceptibilité, une émergence d'insectes, des pourcentages d'attaques et de pertes très élevés, et d'autre part par une dureté faible des grains. Inversement, la variété SWAN est caractérisée par une dureté élevée des grains et une émergence d'adulte, un indice de susceptibilité, des pourcentages d'attaque et de pertes petits.

La Figure (49B) représentant conjointement les paramètres morphologiques et les variétés de maïs suggère de concentrer l'analyse sur l'axe 1 qui porte 66,7 % du pouvoir discriminatoire de l'AFD. La projection des variétés sur cet axe met en évidence une opposition de deux groupes. Un groupe constitué des variétés SWAN, Tzee-Yellow et Early-Thaï (gauche de l'axe 1) et un autre composé de DMR-ES, Tzee-White, Across-Pool (droite de l'axe 1). Le premier groupe cité est caractérisé par des variétés à couleurs jaunes (SWAN, Tzee-Yellow et Early-Thaï) avec une intensité et pureté des couleurs élevées. Les variétés de ce groupe ont enregistré des émergences d'insectes, des pertes pondérales et un indice de susceptibilité les plus petits. Le deuxième groupe, qui est moins attaqué, est caractérisé par des grains de couleur blanche à pureté et intensité élevées. La projection sur le deuxième axe (partie supérieure de l'axe 2) permet de visualiser un groupe de variétés (Obatampa, Synth-9243 et Synth-C) caractérisées par des grains de couleur blanche à clarté et intensité faibles. Ces variétés ont un indice de susceptibilité élevé, et ont enregistré des émergences d'insectes, des attaques et des pertes très élevées.

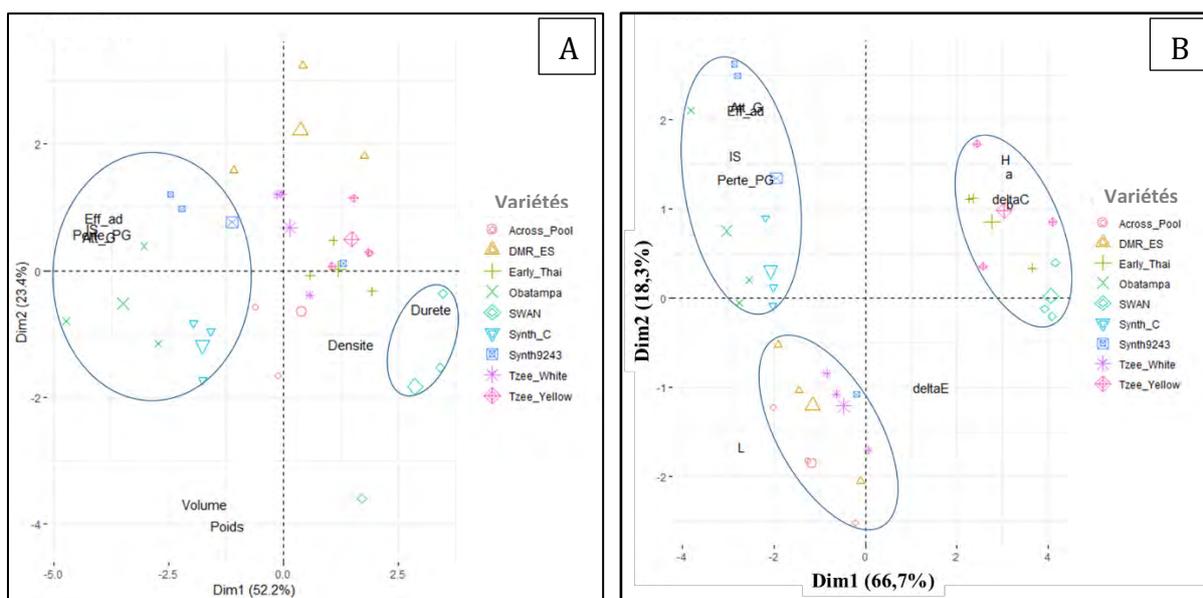


Figure 49 : AFD des variétés sur la base des paramètres morpho-physiques des grains

IV.2.1.2 Corrélations entre les paramètres de sensibilité et biochimique

IV.2.1.2.1 Matrice de liaisons des paramètres de sensibilité aux composés biochimiques complexes

Le Tableau (18) montre des corrélations binaires significatives entre les indicateurs de sensibilité variétale et les constituants biochimiques complexes du maïs. La teneur en eau des grains (HR) est négativement corrélée au nombre d'insectes émergés en F₁ ($\rho = -0,432$; $p_{(\rho)} = 0,0244$), aux pourcentages d'attaque ($\rho = -0,474$; $p_{(\rho)} = 0,0126$) et de pertes pondérales des grains ($\rho = -0,497$; $p_{(\rho)} = 0,0083$) et à l'indice de susceptibilité de Dobie ($\rho = -0,435$; $p_{(\rho)} = 0,0232$). La Teneur en amidon est liée positivement avec les paramètres de sensibilité variétale, et significativement avec le pourcentage d'attaque des grains ($\rho = 0,392$; $p_{(\rho)} = 0,0431$). La teneur en polyphénols (PPT) est fortement corrélée à l'effectif des émergences d'adultes F₁ ($\rho = -0,707$; $p_{(\rho)} < 0,001$), aux pourcentages d'attaque ($\rho = -0,628$; $p_{(\rho)} < 0,001$) et de pertes pondérales ($\rho = -0,730$; $p_{(\rho)} < 0,001$) des grains, et à l'indice de susceptibilité ($\rho = -0,693$; $p_{(\rho)} < 0,001$). L'émergence des insectes en F₁ augmente significativement avec la teneur des grains en protéines ($\rho = 0,382$; $p_{(\rho)} = 0,0493$).

Tableau 18 : Matrice de corrélations des paramètres de sensibilité et composés biochimiques complexes

Variables	Eff_ad	Att_G	Perte_PG	IS	HR	Amidon	PPT	Protéines	MG
Eff_ad	1								
Att_G	0,969***	1							
Perte_PG	0,736***	0,762***	1						
IS	0,861***	0,860***	0,843***	1					
HR	-0,432*	-0,474*	-0,497**	-0,435*	1				
Amidon	0,290.	0,392*	0,360.	0,285.	-0,331.	1			
PPT	-0,707***	-0,628***	-0,730***	-0,693***	0,419*	-0,015.	1		
Protéines	0,382*	0,289.	0,223.	0,361.	-0,352.	-0,216.	-0,472*	1	
MG	-0,052.	0,001.	0,093.	0,047.	-0,055.	0,355.	-0,030.	-0,098.	1

" * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif ; "." non significatif

Eff_ad = Effectif des adultes émergés, **Att_G** = % de grains attaqués, **Perte_PG** = % de pertes de poids des grains, **IS** = Indice de susceptibilité de Dobie, **HR** = Humidité relative des grains, **Amidon** = Teneur en amidon des grains, **PPT** = Teneur en polyphénols des grains, **Protéines** = Teneur en protéines des grains, **MG** = Teneur en matière grasse des grains.

IV.2.1.2.2 Matrice de liaisons des paramètres de sensibilité aux composés biochimiques individuels

De multiples corrélations binaires sont enregistrées entre les indicateurs de la sensibilité du maïs et les constituants biochimiques individuels des grains (Tableau 19).

L'acide férulique (A_Fér) est négativement corrélé au nombre d'adultes émergés en F₁ (rho = -0,408 ; p (rho) = 0,0347), au pourcentage de pertes pondérales (rho = -0,474 ; p (rho) = 0,0126) et à l'indice de susceptibilité des grains (rho = -0,490 ; p (rho) = 0,0094). La teneur en acide palmitique des grains (Palmit) est positivement et fortement corrélée à l'effectif des insectes émergés en F₁ (rho = 0,559 ; p (rho) = 0,0024), aux pourcentages d'attaque (rho = 0,538 ; p (rho) = 0,0038) et de pertes pondérales (rho = 0,639 ; p (rho) = 0,0003), et par conséquent à l'indice de susceptibilité (rho = 0,659 ; p (rho) = 0,0002) des grains de maïs. L'indice de susceptibilité des grains est négativement corrélé aux teneurs en acide arachidique (Arach) (rho = -0,405 ; p (rho) = 0,0363) et en acide béhénique (Behen) (rho = -0,454 ; p (rho) = 0,0173). Ce dernier est lié négativement au pourcentage d'attaque des grains (rho = -0,383 ; p (rho) = 0,0487).

Tableau 19 : Matrice de corrélations des paramètres de sensibilité et composés biochimiques individuels

Variables	Eff_ad	Att_G	Perte_PG	IS	Amyl	A_Fér	Ap_Coum	Palmit	Linol	Arach	Behen
Eff_ad	1										
Att_G	0,969***	1									
Perte_PG	0,736***	0,762***	1								
IS	0,861***	0,860***	0,843***	1							
Amyl	-0,251.	-0,339.	-0,290.	-0,380.	1						
A_Fér	-0,408*	-0,363.	-0,474*	-0,490**	0,262.	1					
Ap_Coum	0,397*	0,353.	0,092.	0,340.	-0,362.	-0,221.	1				
Palmit	0,559**	0,538**	0,639***	0,659***	-0,462*	-0,770***	0,438*	1			
Linol	-0,097.	-0,083.	-0,138.	-0,072.	0,089.	0,562**	-0,201.	-0,653***	1		
Arach	-0,269.	-0,270.	-0,231.	-0,405*	0,273.	0,253.	-0,253.	-0,220.	-0,314.	1	
Behen	-0,342.	-0,383*	-0,327.	-0,454*	0,378.	0,223.	-0,253.	-0,244.	-0,267.	0,927***	1

" * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif ; "." non significatif

Eff_ad = Effectif des adultes émergés, **Att_G** = % de grains attaqués, **Perte_PG** = % de pertes de poids des grains, **IS** = Indice de susceptibilité de Dobie, **Amyl** = Teneur en Amylose de l'amidon des grains, **A_Fér** = Teneur en acide férulique des polyphénols des grains, **Ap_Coum** = Teneur en acide para-coumarique des polyphénols des grains, **Palmit** = Teneur en acide palmitique des acides gras des grains, **Linol** = Teneur en acide linoléique des acides gras des grains, **Arach** = Teneur en acide arachidique des acides gras des grains, **Behen** = Teneur en acide béhénique des acides gras des grains.

IV.2.1.2.3 Analyses en Composantes Principales (ACP)

Les valeurs propres des principales dimensions ressorties de l'ACP des composés biochimiques complexes et des paramètres de sensibilité des grains (Figure 50A), indiquent 70,4 % d'inertie totale pour les deux premières dimensions. Ces dernières expliquent respectivement 51,32 % et 19,08 % de l'information que contiennent les neuf (09) variables utilisées (Tableau 18). Ainsi, nous avons retenu ces deux axes qui donnent une inertie totale suffisante pour garantir une interprétation fiable des composés biochimiques complexes sur la sensibilité des grains.

Les composantes principales sont colorées (rouge à vert sur l'ACP) et retenues selon leurs contributions significatives dans la construction des dimensions. Certaines d'entre-elles participent significativement à la construction de la première dimension (PPT : Cont_1 = 11,35 % ; Perte_PG : Cont_1 = 16,43 % ; Eff_ad : Cont_1 = 17,88 % ; Att_G : Cont_1 = 18,05 % et IS : Cont_1 = 19,29 %) et les autres à celle de la deuxième dimension (PPT : Cont_2 = 14,15 % ; Proteines : Cont_2 = 20,03 % ; MG : Cont_2 = 26,74 % et Amidon : Cont_2 = 36,47 %).

Dans le cercle de corrélations formé par ces deux dimensions, nous avons, à droite de la première dimension, un regroupement de variables fortement corrélées entre elles. Ce sont l'effectif des émergences en F₁ (Eff_ad), le pourcentage de pertes pondérales des grains (Perte_PG), le pourcentage d'attaque (Att_G), et l'indice de susceptibilité (IS).

A l'opposé de ce groupe se trouvent les teneurs en polyphénols (PPT) et en eau des grains (HR). Dans la partie supérieure de la deuxième dimension, se trouvent les teneurs en amidon et en matière grasse, et à l'inverse (partie inférieure) nous avons les protéines.

Les deux premières dimensions du graphique des valeurs propres de l'ACP sur les composés biochimiques individuels et les variétés (Figure 50B) expliquent respectivement 46,63 % et 20,67 % de l'information que contiennent les onze (11) variables utilisées (Tableau 19). Avec ces deux axes, nous avons une inertie totale de 67,3 %, qui est suffisante pour une bonne interprétation des composés biochimiques individuels sur la sensibilité des grains.

Les composantes principales (CP) sont colorées (bleu à vert sur l'ACP) et retenues selon leurs contributions significatives dans la construction des dimensions. La première dimension est construite par des CP que sont A_Fér (Cont_1 = 9,23 %), Palmit (Cont_1 = 12,40 %), Perte_PG (Cont_1 = 12,77 %), Eff_ad (Cont_1 = 15,15 %), Att_G (Cont_1 = 15,40 %) et IS (Cont_1 = 16,82 %). La deuxième dimension est construite à partir des contributions des CP comme Behen (Cont_2 = 23,33 %), Arach (Cont_2 = 29,77 %) et Linol (Cont_2 = 33,63 %).

Le plan factoriel formé par ces deux dimensions (Dim1 et Dim2) permet de visualiser certaines variables à droite (IS, Eff_ad, Att_G, Perte_PG et Palmit) et à gauche (A_Fér et Amyl) de la première dimension et d'autres autour de la deuxième dimension (Behen et Arach dans la partie inférieure et Linol dans la partie supérieure).

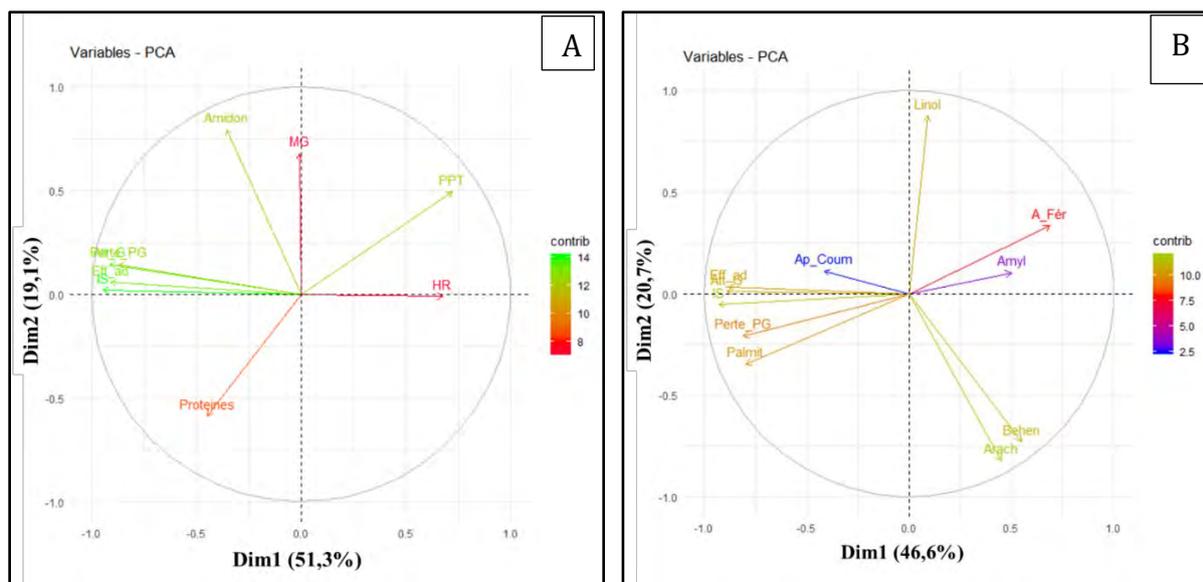


Figure 50 : ACP des paramètres de sensibilité à *S. zeamais* et biochimiques des grains

IV.2.1.2.4 Analyses Factorielles Discriminantes (AFD)

Concernant la représentation conjointe des paramètres biochimiques complexes et des variétés de maïs (Figure 51A), c'est la teneur en polyphénols des grains qui détient le plus de pouvoir discriminatoire des variétés vis-à-vis de leur sensibilité à *S. zeamais*. Les variétés SWAN et Tzee-White se sont montrées très riches en polyphénols (partie gauche de l'axe 1) et inversement (partie droite de l'axe 1), les variétés Obatampa, Synth-C et Synth-9243 sont caractérisées par de petites teneurs en polyphénols, une importante émergence d'adultes, des attaques et pertes pondérales élevées et par conséquent un fort indice de susceptibilité. La variété Tzee-White, bien que riche en polyphénols, a une petite teneur en eau. Suivant l'axe 2, on constate que la variété DMR-ES est très riche en protéines.

La projection des variétés sur l'axe 1 (46,6 % du pouvoir discriminatoire de l'AFD) de la représentation conjointe des variétés de maïs et des composés biochimiques individuels (Figure 51B) met en évidence une opposition de deux groupes. Celui constitué des variétés Obatampa et Synth-C (à droite) et le groupe composé de SWAN, Tzee-Yellow et Early-Thaï (à gauche). Pour le premier groupe, la variété Obatampa est caractérisée par des teneurs en acide palmitique très fortes et en acide férulique très petites. Quant à Synth-C, c'est une variété sensible caractérisée surtout par une teneur élevée en acide palmitique. Ces deux variétés ont subi d'énormes pertes pondérales. L'autre groupe composé des variétés Early-Thaï, SWAN et Tzee-Yellow, est caractérisé par des teneurs élevées en polyphénols et petites en acide palmitique.

Elles ont enregistré moins de pertes pondérales. La projection sur l'axe 2 (20,7 % du pouvoir discriminatoire de l'AFD) permet de distinguer deux groupes. Un groupe constitué des variétés Synth-9243 et Tzee-Yellow, caractérisées par des teneurs élevées en acide linoléique, en opposition avec l'autre groupe composé de DMR-ES, Tzee-White et Across-Pool. Ces dernières sont caractérisées par des teneurs élevées en acide béhénique et en acide arachidique.

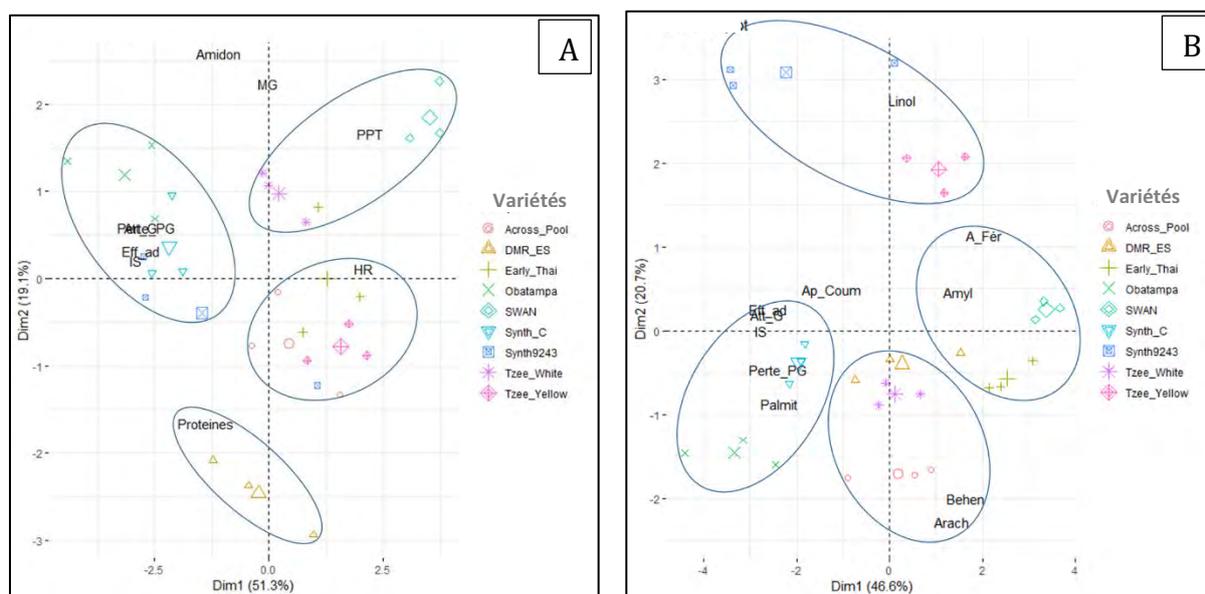


Figure 51 : AFD des variétés sur la base des composés biochimiques

IV.2.1.3 Liaisons entre paramètres de sensibilité, morpho-physique et biochimiques

IV.2.1.3.1 Matrice de liaisons des variables

Le Tableau (20) présente les liaisons binaires entre les variables de sensibilité, morpho-physique et biochimiques des grains des différentes variétés de maïs. Globalement, l'indice de susceptibilité des grains (IS) est positivement corrélé à la teneur en acide palmitique ($\rho = 0,659$; $p_{(\rho)} = 0,0002$) et à la clarté (L^*) ($\rho = 0,488$; $p_{(\rho)} = 0,0098$) des grains, et inversement lié aux teneurs en polyphénols ($\rho = -0,693$; $p_{(\rho)} < 0,0001$) tel que l'acide férulique ($\rho = -0,490$; $p_{(\rho)} = 0,0094$), en acide béhénique ($\rho = -0,454$; $p_{(\rho)} = 0,0173$), à la dureté ($\rho = -0,510$; $p_{(\rho)} = 0,0066$), aux couleurs rouge (a^*) ($\rho = -0,500$; $p_{(\rho)} = 0,0079$) et jaune (b^*) ($\rho = -0,573$; $p_{(\rho)} = 0,0018$) et à la pureté de la couleur (ΔC) ($\rho = -0,571$; $p_{(\rho)} = 0,0019$) des grains.

Les pertes pondérales des grains se sont corrélées négativement avec les polyphénols ($\rho = -0,730$; $p_{(\rho)} < 0,0001$), l'acide férulique ($\rho = -0,474$; $p_{(\rho)} = 0,0126$), la dureté des grains ($\rho = -0,574$; $p_{(\rho)} = 0,0017$), les couleurs rouge ($\rho = -0,465$; $p_{(\rho)} = 0,0145$) et jaune ($\rho = -0,542$; $p_{(\rho)} = 0,0035$) ainsi que la pureté de la couleur ($\rho = -0,522$; $p_{(\rho)} = 0,0052$) des grains. Des corrélations négatives sont notées sur les liaisons du nombre d'insectes émergés en F₁ avec les polyphénols ($\rho = -0,707$; $p_{(\rho)} < 0,0001$), l'acide férulique ($\rho = -0,408$; $p_{(\rho)} = 0,0347$), la dureté ($\rho = -0,450$; $p_{(\rho)} = 0,0184$), la couleur rouge ($\rho = -0,440$; $p_{(\rho)} = 0,0216$), la couleur jaune ($\rho = -0,496$; $p_{(\rho)} = 0,0085$) et à la pureté de la couleur ($\rho = -0,491$; $p_{(\rho)} = 0,0093$) des grains. Par contre, le nombre d'insectes émergés en F₁ est positivement corrélé avec la clarté de grains ($\rho = 0,465$; $p_{(\rho)} = 0,0145$), avec les teneurs des grains en acide palmitique ($\rho = 0,559$; $p_{(\rho)} = 0,0024$), en acide para-coumarique ($\rho = 0,397$; $p_{(\rho)} = 0,0401$) et en protéines ($\rho = 0,382$; $p_{(\rho)} = 0,0493$).

Tableau 20 : Matrice de corrélations des paramètres de sensibilité, morpho-physique et biochimiques

Variabl es	Eff_ad	Perte_PG	IS	PPT	A_Fér	Palmit	Behen	Durete	L*	a*	b*	ΔC	Ap_Coum	Proteines
Eff_ad	1													
Perte_PG	0,736***	1												
IS	0,861***	0,843***	1											
PPT	-0,707***	-0,730***	-0,693***	1										
A_Fér	-0,408*	-0,474*	-0,490**	0,673***	1									
Palmit	0,559**	0,639***	0,659***	-0,661***	-0,770***	1								
Behen	-0,342.	-0,327.	-0,454*	0,360.	0,223.	-0,244.	1							
Durete	-0,450*	-0,574**	-0,510**	0,487*	0,698***	-0,818***	0,211.	1						
L*	0,465*	0,480*	0,488**	-0,453*	-0,747***	0,830***	-0,048.	-0,859***	1					
a*	-0,440*	-0,465*	-0,500**	0,541**	0,787***	-0,883***	0,063.	0,805***	-0,958***	1				
b*	-0,450*	-0,542**	-0,573**	0,687***	0,820***	-0,689***	0,349.	0,533**	-0,698***	0,757***	1			
ΔC	-0,491**	-0,522**	-0,571**	0,684***	0,822***	-0,709***	0,339.	0,545**	-0,715***	0,779***	0,997***	1		
Ap_Coum	0,397*	0,092.	0,340.	-0,245.	-0,221.	0,438*	-0,253.	-0,164.	0,217.	-0,338.	-0,297.	-0,314.	1	
Proteines	0,382*	0,223.	0,361.	-0,472*	-0,379.	0,639***	-0,373.	-0,425*	0,485*	-0,605***	-0,446*	-0,457*	0,521**	1

" * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif ; "." non significatif

Eff_ad = Effectif des adultes émergés, **Perte_PG** = % de pertes de poids des grains, **IS** = Indice de susceptibilité de Dobie, **PPT** = Teneur en polyphénols des grains, **A_Fér** = Teneur en acide férulique des polyphénols des grains, **Palmit** = Teneur en acide palmitique des acides gras des grains, **Behen** = Teneur en acide béhénique des acides gras des grains, **Duree** = Dureté moyenne d'un grain, **L*** = Clarté de la surface du grain (0 à 100 = sombre à clair), **a*** = degré de couleur rouge à vert (+ a* = plus de rouge, -a* = plus de vert), **b*** = degré de couleur jaune à bleu (+ b* = plus de jaune, -b* = plus de bleu), **ΔC** = intensité du au chroma (qui reflète la pureté de la couleur), **Ap_Coum** = Teneur en acide para-coumarique des polyphénols des grains et **Protéines** = Teneur en protéines des grains.

IV.2.1.3.2 Analyses en Composantes Principales (ACP)

Le graphique des valeurs propres des ACP sur les paramètres morpho-physique, biochimique et de sensibilité des grains (Figure 52), suggère de retenir les deux premières dimensions qui expliquent respectivement 60,9 % et 11,1 % de l'information que contiennent les quatorze (14) variables utilisées (Tableau 20). Avec ces deux axes factoriels, nous avons une inertie totale de 72 %, qui est suffisante pour garantir une interprétation fiable des paramètres morpho-physique et biochimique sur la sensibilité des grains de maïs.

Les composantes principales sont colorées (bleu à vert sur l'ACP) et retenues selon leurs contributions significatives dans la construction des deux dimensions.

Certaines d'entre-elles participent significativement à la construction de la première dimension (IS : Cont_1 = 7,23 % ; Durete : Cont_1 = 7,89 % ; L* : Cont_1 = 8,19 % ; A_Fér : Cont_1 = 8,36 % ; b* : Cont_1 = 10,35 % ; Palmit : Cont_1 = 10,36 % ; ΔC : Cont_1 = 10,50 % et a* : Cont_1 = 10,54 %) et les autres à celle de la deuxième dimension (Proteines : Cont_2 = 8,64 % ; L* : Cont_2 = 10,73 % ; Perte_PG : Cont_2 = 17,24 % ; IS : Cont_2 = 17,87 % et Eff_ad : Cont_2 = 21,35 %).

Ces deux dimensions forment un cercle de corrélations qui regroupe à droite de la première dimension les variables corrélées entre elles, comme la teneur en acide palmitique (Palmit) et la clarté des grains (L*), sous lesquelles se trouve l'indice de susceptibilité (IS). A l'inverse, en corrélations négatives avec les variables du groupe précédent, se trouve un deuxième groupe constitué de la dureté, de la teneur en acide Férulique (A_Fér), des couleurs jaune (b*) et rouge (a*) et de la pureté de la couleur (ΔC) des grains. Dans la partie inférieure de la deuxième dimension, se trouve un groupe constitué de l'effectif des émergences (Eff_ad), du pourcentage de pertes pondérales des grains (Perte_PG) et de l'indice de susceptibilité (IS). A l'opposé de ces dernières, en corrélations négatives, se trouvent la clarté (L*) et la teneur en protéines des grains.

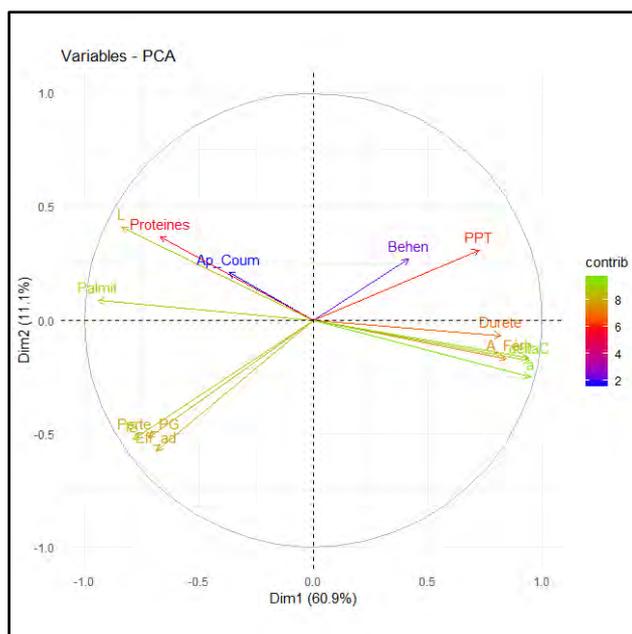


Figure 52 : ACP des paramètres de sensibilité à *S. zeamais*, morphophysiques et biochimiques des grains

IV.2.1.3.3 Analyses Factorielles Discriminantes (AFD)

Le graphique de la représentation conjointe des variables morpho-physiques et biochimiques avec les variétés de maïs indique que 60,9 % (Figure 53) du pouvoir discriminatoire de l'AFD est porté par la 1^{ère} dimension. L'analyse des variétés suivant cette dimension permet de constater une opposition entre deux groupes. Un groupe (droite de l'axe) constitué des variétés Obatampa, Synth-C et Synth92, qui sont marquées par une émergence d'insectes très importante, un pourcentage de pertes pondérales des grains et un indice de susceptibilité très élevés. Ces variétés sont de couleur blanche de moindre intensité et ont des teneurs élevées en acide palmitique. Elles ont également des grains de faible dureté avec de petites teneurs en polyphénols et en acide bényhénique. A l'opposé (gauche de l'axe), nous avons la variété SWAN qui a enregistré peu d'émergences d'insectes et de pertes pondérales en grains, et un petit indice de susceptibilité. C'est une variété caractérisée par une dureté des grains, des teneurs en polyphénols et en acide bényhénique très élevées. Elle est de couleur jaune avec un degré de couleur rouge faible. L'analyse de l'AFD suivant la deuxième dimension (11,1 % du pouvoir discriminatoire de l'AFD) permet également de distinguer deux groupes de variétés. Un groupe constitué des variétés DMR-ES, Tzee-White et Across-Pool (partie supérieure de l'axe 2), caractérisées par des teneurs en protéines élevées et des grains de couleur blanche à clarté très élevée. Elles ont également de petites teneurs en acide férulique.

Un autre groupe en opposition (partie inférieure de l'axe 2), constitué des variétés Tzee-Yellow et Early-Thaï. Ces dernières sont caractérisées par des grains à forte dureté avec des teneurs élevées en acide férulique. Elles sont de couleur jaune pure.

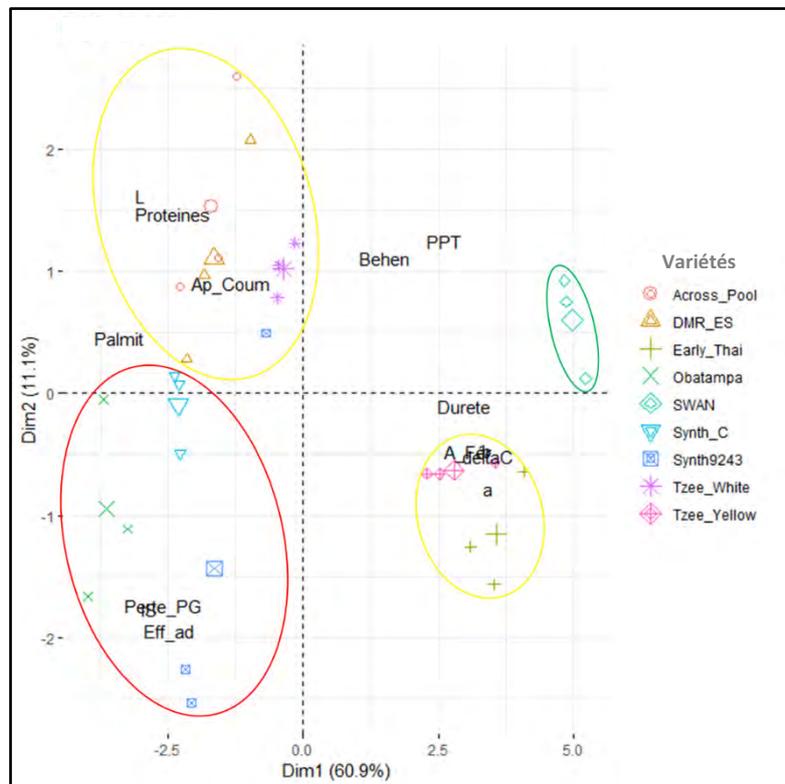


Figure 53 : AFD des variétés sur la base des paramètres morpho-physiques et biochimiques

IV.2.2 Variabilités inter-variétales aux risques d'infestation par *P. truncatus*

IV.2.2.1 Corrélations entre les paramètres de sensibilité et morpho-physique

IV.2.2.1.1 Matrice de liaisons entre paramètres physique et de sensibilité

Le résultat des corrélations (Tableau 21) montre que l'effectif des descendants de la première génération (F_1) de *P. truncatus* est négativement lié à la dureté des grains ($\rho = -0,429$; $p_{(\rho)} = 0,0255$). Cette dernière est également corrélée négativement au pourcentage d'attaque des grains ($\rho = -0,473$; $p_{(\rho)} = 0,0126$). Le volume des grains est positivement corrélé au nombre d'insectes émergés en F_1 ($\rho = 0,400$; $p_{(\rho)} = 0,0385$) et à l'indice de susceptibilité du maïs ($\rho = 0,405$; $p_{(\rho)} = 0,0361$).

Tableau 21 : Matrice de corrélations des paramètres physiques et de sensibilité

Variables	Eff_ad	Att_G	Perte_PG	IS	Dureté	Densité	Volume	Poids
Eff_ad	1							
Att_G	0,535**	1						
Perte_PG	0,527**	0,653***	1					
IS	0,855***	0,447*	0,530**	1				
Dureté	-0,429*	-0,473*	-0,142.	-0,351.	1			
Densité	-0,123.	-0,367.	-0,158.	-0,022.	0,382*	1		
Volume	0,400*	0,031.	0,081.	0,405*	-0,162.	-0,092.	1	
Poids	0,326.	-0,165.	-0,029.	0,396*	-0,003.	0,290.	0,904***	1

" * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif ; "." non significatif

Eff_ad = Effectif des adultes émergés, **Att_G** = % de grains attaqués, **Perte_PG** = % de pertes de poids des grains, **IS** = Indice de susceptibilité de Dobie, **Dureté** = Dureté moyenne d'un grain, **Densité** = Densité moyenne d'un grain, **Volume** = Volume moyen d'un grain, **Poids** = Poids moyen d'un grain.

IV.2.2.1.2 Matrice de liaisons entre paramètres morphologique et de sensibilité

Les paramètres morphologiques des grains sont diversement corrélés à ceux de la sensibilité du maïs au grand capucin (Tableau 22). L'indice de susceptibilité est négativement corrélé à la couleur jaune ($\rho = -0,538$; $p_{(\rho)} = 0,0038$), à l'intensité de la couleur ($\rho = -0,409$; $p_{(\rho)} = 0,0340$) et à la pureté de la couleur ($\rho = -0,526$; $p_{(\rho)} = 0,0048$) du grain. L'effectif des émergences en F₁ est inversement et fortement lié à la coloration jaune ($\rho = -0,697$; $p_{(\rho)} < 0,0001$), à l'intensité des couleurs ($\rho = -0,500$; $p_{(\rho)} = 0,0080$) et à la pureté de la couleur ($\rho = -0,683$; $p_{(\rho)} < 0,0001$) des grains. Le pourcentage d'attaque est corrélé positivement à la clarté des grains ($\rho = 0,473$; $p_{(\rho)} = 0,0128$) et négativement à la couleur jaune ($\rho = -0,666$; $p_{(\rho)} = 0,0001$), à la pureté de la couleur ($\rho = -0,634$; $p_{(\rho)} = 0,0004$), à l'angle de teinte ($\rho = -0,512$; $p_{(\rho)} = 0,0063$) et à l'intensité des couleurs ($\rho = -0,467$; $p_{(\rho)} = 0,0140$).

Tableau 22 : Matrice de corrélations des paramètres morphologique et de sensibilité

Variables	Eff_ad	Att_G	Perte_PG	IS	L*	a*	b*	H	ΔE	ΔC
Eff_ad	1									
Att_G	0,535**	1								
Perte_PG	0,527**	0,653***	1							
IS	0,855***	0,447*	0,530**	1						
L*	0,347.	0,473*	-0,062.	0,250.	1					
a*	-0,347.	-0,482*	0,097.	-0,256.	-0,958***	1				
b*	-0,697***	-0,666***	-0,240.	-0,538**	-0,698***	0,757***	1			
H	-0,334.	-0,512**	0,067.	-0,227.	-0,974***	0,970***	0,695***	1		
ΔE	-0,500**	-0,467*	-0,329.	-0,409*	-0,021.	0,198.	0,589**	0,045.	1	
ΔC	-0,683***	-0,634***	-0,194.	-0,526**	-0,715***	0,779***	0,997***	0,717***	0,572**	1

" * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif ; "." non significatif

Eff_ad = Effectif des adultes émergés, **Att_G** = % de grains attaqués, **Perte_PG** = % de pertes de poids des grains, **IS** = Indice de susceptibilité de Dobie, **L*** = Clarté de la surface du grain (0 à 100 = sombre à clair), **a*** = degré de couleur rouge à vert (+ a* = plus de rouge, -a* = plus de vert), **b*** = degré de couleur jaune à bleu (+ b* = plus de jaune, -b* = plus de bleu), **H** = angle de teinte ou coordonnées cylindriques de teinte, **ΔE** = intensité des couleurs, **ΔC** = intensité du au chroma (qui reflète la pureté de la couleur)

IV.2.2.1.3 Analyses en Composantes Principales (ACP)

Les deux premières dimensions du graphique des valeurs propres de l'ACP expliquent au mieux l'influence des paramètres physiques sur la sensibilité des grains (Figure 54A), avec une inertie totale de 68,94 %. La première dimension (Dim_1) qui explique 42,92 % de la sensibilité, est construite par des CP que sont Dureté des grains (Cont_1 = 9,82 %), Perte_PG (Cont_1 = 13,70 %), Att_G (Cont_1 = 15,10 %), IS (Cont_1 = 22,86 %) et Eff_ad (Cont_1 = 23,62 %). La deuxième dimension (Dim_2) qui porte 26,02 de l'inertie totale est construite à partir des contributions des CP comme Att_G (Cont_2 = 15,47 %), Volume (Cont_2 = 28,79 %) et Poids (Cont_2 = 38,68 %).

Dans le cercle de corrélations formé par ces deux dimensions, nous avons, en droite la première dimension, l'effectif des émergences (Eff_ad) et l'indice de susceptibilité (IS), sous lequel groupe se trouve les pourcentages d'attaque (Att_G) et de pertes pondérales (Perte_PG) des grains. A l'opposé, en corrélations négatives avec ces variables, nous avons la dureté des grains. Dans la partie supérieure de la deuxième dimension, se trouvent le volume et le poids des grains, et dans la partie inférieure, nous avons le pourcentage d'attaque (Att_G) des grains.

Le graphique des valeurs propres de l'ACP (Figure 54B) sur la matrice de corrélations (Tableau 22) suggère de retenir les deux premiers axes qui expliquent respectivement 64,24 % et 20,92 % de l'information globale. Ces deux axes expliquent une inertie totale de 85,16 %, qui est assez élevée pour garantir une interprétation fiable des paramètres morphologique sur la sensibilité des grains au grand capucin du maïs.

Les composantes principales sont colorées (bleu à vert sur l'ACP) et retenues selon leurs contributions dans la construction des axes. Certaines d'entre-elles participent significativement à la construction de la première dimension (Att_G : Cont_1 = 10,14 % ; H : Cont_1 = 12,87 % ; a* : Cont_1 = 13,80 % ; b* : Cont_1 = 14,41 % et ΔC : Cont_1 = 14,46 %) et les autres à celle de la deuxième dimension (L* : Cont_2 = 18,84 % ; ΔE : Cont_2 = 20,00 % et Perte_PG : Cont_2 = 24,42 %).

Ces deux dimensions forment un cercle de corrélations qui regroupe, suivant la première dimension, les variables telles le pourcentage d'attaque (Att_G), l'effectif des émergences (Eff_ad) et l'indice de susceptibilité (IS) à droite, ensuite l'angle de teinte (H), les couleurs rouges (a*) et jaunes (b*) et la pureté de la couleur (ΔC) à gauche.

Dans la partie inférieure de la deuxième dimension, nous avons la clarté des grains (L^*) et l'intensité de la couleur (ΔE), à l'opposé desquelles (partie supérieure) se trouve le pourcentage de pertes pondérales des grains (Perte_PG).

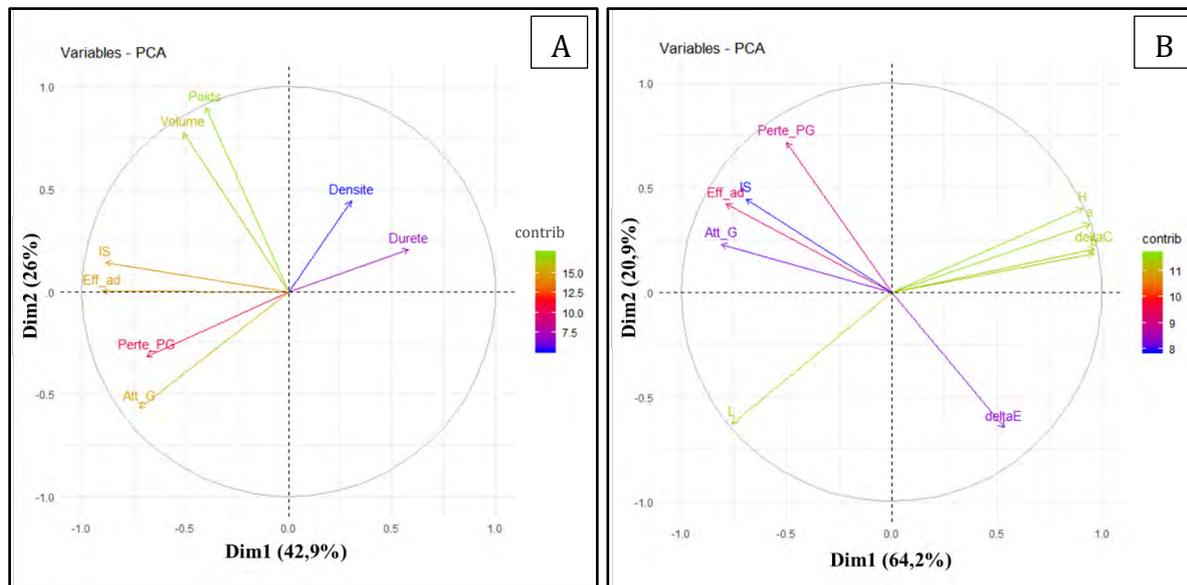


Figure 54 : ACP des paramètres de sensibilité à *P. truncatus* et morphophysiques des grains

IV.2.2.1.4 Analyses Factorielles Discriminantes (AFD)

L'analyse de l'AFD (Figure 55A) suivant la première dimension (42,92 % du pouvoir discriminatoire de l'AFD) permet d'identifier deux groupes de variétés. Un groupe constitué des variétés Early-Thaï et Tzee-Yellow (gauche de l'axe 1), qui ont enregistré peu d'attaques et de pertes pondérales et qui se caractérisent par des grains durs. A l'opposé (droite de l'axe 1), se trouve la variété Synth-9243, qui est constituée de grains à faible dureté. Elle a enregistré d'énormes attaques et pertes pondérales. Suivant la deuxième dimension (26,02 % du pouvoir discriminatoire de l'AFD), nous avons également deux groupes de variétés en opposition. A la partie inférieure de l'axe 2, se trouve la variété DMR-ES, qui est caractérisée par des grains de petits volume et poids, et qui a enregistré peu d'émergences d'insectes avec un petit indice de susceptibilité. Un autre groupe en opposition (partie supérieure de l'axe 2), qui est constitué des variétés Obatampa et Synth-C, caractérisées par des grains à volume et à poids élevés. Elles sont marquées par un nombre d'insectes émergés et indice de susceptibilité élevés.

La représentation conjointe des paramètres morphologiques et des variétés de maïs (Figure 55B) suggère de concentrer l'analyse sur l'axe 1 qui porte 64,2 % du pouvoir discriminatoire de l'AFD. Suivant cet axe, nous avons deux groupes en opposition.

Un groupe constitué des variétés SWAN, Tzee-Yellow et Early-Thaï (gauche de l'axe 1) et le groupe composé de DMR-ES, Tzee-White, Across-Pool et Obatampa (droite de l'axe 1). Le premier groupe qui enregistre peu attaques d'insectes est constitué de variétés à couleur jaune (SWAN, Tzee-Yellow et Early-Thaï) avec une pureté des couleurs très élevée, alors que le deuxième groupe, moins attaqué, est caractérisé par des variétés qui ont des gains de couleur blanche très intense. La projection sur le deuxième axe donne un groupe de variétés (Synth-9243 et Synth-C) caractérisées par des grains de couleur blanche à clarté et intensité faibles. Ce sont des variétés à indice de susceptibilité élevé, qui ont enregistré beaucoup d'émergences d'adultes, de pourcentages d'attaques et de pertes très élevés.

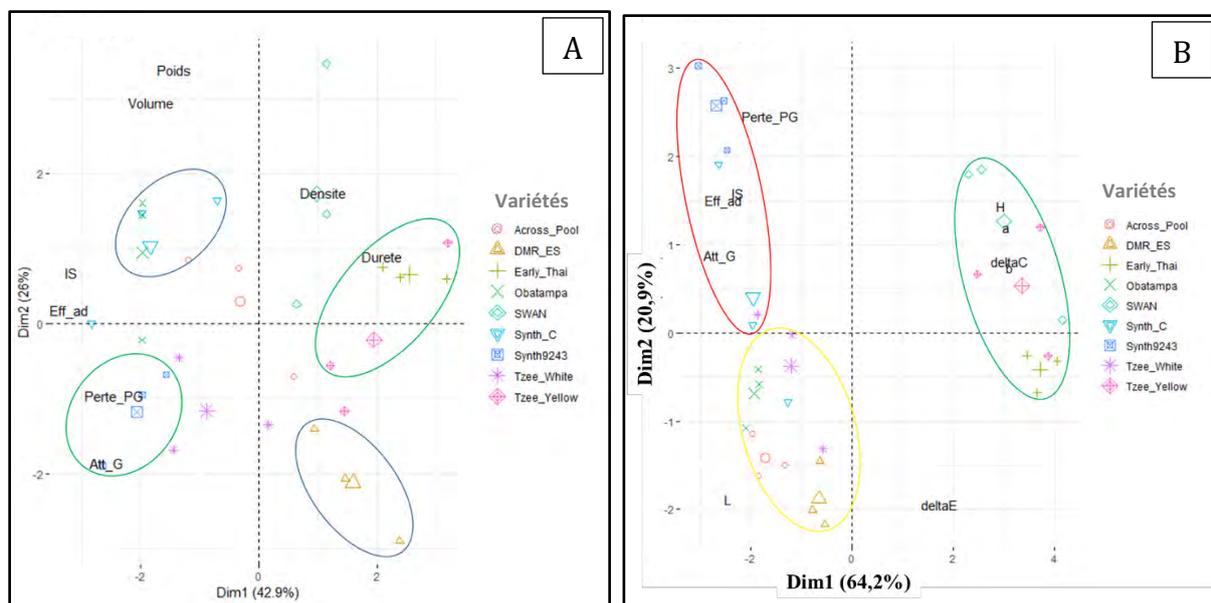


Figure 55 : AFD des variétés sur la base des paramètres morpho-physiques.

IV.2.2.2 Corrélations entre les paramètres de sensibilité et biochimique

IV.2.2.2.1 Matrice de liaisons des paramètres de sensibilité aux composés complexes

L'analyse du Tableau (23) montre de fortes corrélations négatives entre l'indice de susceptibilité et la teneur en eau des grains ($\rho = -0,540$; $p_{(\rho)} = 0,0037$), les polyphénols et le nombre d'adultes émergés en F₁ ($\rho = -0,578$; $p_{(\rho)} = 0,0016$), la teneur en eau des grains et le nombre d'adultes émergés en F₁ ($\rho = -0,563$; $p_{(\rho)} = 0,0022$), le pourcentage d'attaque et la teneur en eau des grains ($\rho = -0,565$; $p_{(\rho)} = 0,0021$). Le nombre d'adultes émergés en F₁ augmente avec la teneur en amidon ($\rho = 0,428$; $p_{(\rho)} = 0,0258$) et avec la teneur en matières grasses ($\rho = 0,450$; $p_{(\rho)} = 0,0184$).

L'indice de susceptibilité est corrélé positivement aux teneurs en amidon ($\rho = 0,468$; $p_{(\rho)} = 0,0139$) et en matières grasses ($\rho = 0,400$; $p_{(\rho)} = 0,0389$) et négativement à la teneur en polyphénols ($\rho = -0,451$; $p_{(\rho)} = 0,0181$) des grains. Le pourcentage d'attaque augmente avec la teneur en protéines ($\rho = 0,394$; $p_{(\rho)} = 0,0421$) des grains.

Tableau 23 : Matrice de corrélation des paramètres de sensibilité et de composés complexes

Variables	Eff_ad	Att_G	Perte_PG	IS	HR	Amidon	PPT	Protéines	MG
Eff_ad	1								
Att_G	0,535**	1							
Perte_PG	0,527**	0,653***	1						
IS	0,855***	0,447*	0,530**	1					
HR	-0,563**	-0,565**	-0,377.	-0,540**	1				
Amidon	0,428*	-0,136.	0,208.	0,468*	-0,331.	1			
PPT	-0,578**	-0,363.	-0,093.	-0,451*	0,419*	-0,015.	1		
Protéines	0,076.	0,394*	-0,054.	0,038.	-0,352.	-0,216.	-0,472*	1	
MG	0,450*	0,112.	0,261.	0,400*	-0,055.	0,355.	-0,030.	-0,098.	1

" * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif ; "." non significatif

Eff_ad = Effectif des adultes émergés, **Att_G** = % de grains attaqués, **Perte_PG** = % de pertes de poids des grains, **IS** = Indice de susceptibilité de Dobie, **HR** = Humidité relative des grains, **Amidon** = Teneur en amidon des grains, **PPT** = Teneur en polyphénols des grains, **Protéines** = Teneur en protéines des grains, **MG** = Teneur en matière grasse des grains.

IV.2.2.2 Matrice de liaisons des paramètres de sensibilité aux composés individuels

La matrice des corrélations (Tableau 24) met en exergue différentes liaisons entre les paramètres. La teneur en amylose est fortement et négativement corrélée à l'effectif des insectes émergés en F₁ ($\rho = -0,559$; $p_{(\rho)} = 0,0025$) et à l'indice de susceptibilité ($\rho = -0,577$; $p_{(\rho)} = 0,0016$) des grains. La teneur en acide férulique augmente fortement en sens inverse avec le nombre d'insectes émergés en F₁ ($\rho = -0,662$; $p_{(\rho)} = 0,0002$) et le pourcentage d'attaque ($\rho = -0,647$; $p_{(\rho)} = 0,0003$) et modérément avec l'indice de susceptibilité ($\rho = -0,485$; $p_{(\rho)} = 0,0104$) des grains. La teneur en acide palmitique est positivement corrélée au nombre d'insectes émergés en F₁ ($\rho = 0,553$; $p_{(\rho)} = 0,0028$), au pourcentage d'attaque ($\rho = 0,440$; $p_{(\rho)} = 0,0216$) et à l'indice de susceptibilité ($\rho = 0,492$; $p_{(\rho)} = 0,0092$) des grains. Des corrélations négatives sont notées entre la teneur en acide linoléique et le pourcentage d'attaque ($\rho = -0,437$; $p_{(\rho)} = 0,0228$), la teneur en acide arachidique et le nombre d'insectes émergés en F₁ ($\rho = -0,391$; $p_{(\rho)} = 0,0439$), la teneur en acide arachidique et le pourcentage de pertes pondérales ($\rho = -0,466$; $p_{(\rho)} = 0,0143$) des grains.

La teneur en acide béhénique est inversement et fortement corrélée au nombre d'insectes émergés en F1 ($\rho = -0,508$; $p_{(\rho)} = 0,0068$), au pourcentage de pertes pondérales ($\rho = -0,575$; $p_{(\rho)} = 0,0017$), à l'indice de susceptibilité ($\rho = -0,515$; $p_{(\rho)} = 0,0059$) et moyennement au pourcentage d'attaque ($\rho = -0,419$; $p_{(\rho)} = 0,0294$) des grains.

Tableau 24: Matrice de corrélation des paramètres de sensibilité et composés individuels

Variables	Eff_ad	Att_G	Perte_PG	IS	Amyl	A_Fér	Ap_Coum	Palmit	Linol	Arach	Behen
Eff_ad	1										
Att_G	0,535**	1									
Perte_PG	0,527**	0,653***	1								
IS	0,855***	0,447*	0,530**	1							
Amyl	-0,559**	0,009.	-0,244.	-0,577**	1						
A_Fér	-0,662***	-0,647***	-0,254.	-0,485*	0,262.	1					
Ap_Coum	0,237.	0,065.	-0,029.	0,319.	-0,362.	-0,221.	1				
Palmit	0,553**	0,440*	0,001.	0,492**	-0,462*	-0,770***	0,438*	1			
Linol	-0,182.	-0,437*	0,061.	-0,085.	0,089.	0,562**	-0,201.	-0,653***	1		
Arach	-0,391*	-0,355.	-0,466*	-0,368.	0,273.	0,253.	-0,253.	-0,220.	-0,314.	1	
Behen	-0,508**	-0,419*	-0,575**	-0,515**	0,378.	0,223.	-0,253.	-0,244.	-0,267.	0,927.	1

" * " Significatif ; " ** " très significatif ; " *** " hautement significatif ; "." non significatif

Eff_ad = Effectif des adultes émergés, **Att_G** = % de grains attaqués, **Perte_PG** = % de pertes de poids des grains, **IS** = Indice de susceptibilité de Dobie, **Amyl** = Teneur en Amylose de l'amidon des grains, **A_Fér** = Teneur en acide férulique des polyphénols des grains, **Ap_Coum** = Teneur en acide para-coumarique des polyphénols des grains, **Palmit** = Teneur en acide palmitique des acides gras des grains, **Linol** = Teneur en acide linoléique des acides gras des grains, **Arach** = Teneur en acide arachidique des acides gras des grains, **Behen** = Teneur en acide béhénique des acides gras des grains,

IV.2.2.2.3 Analyses en Composantes Principales (ACP)

Les deux premières dimensions du graphique des valeurs propres de l'ACP (Figure 56A) sur les variables du Tableau (23) expliquent une inertie totale de 65,4 %, suffisante pour une interprétation fiable des composés biochimiques complexes sur la sensibilité du maïs à *P. truncatus*. La première dimension (Dim_1) explique 42,78 % de l'inertie totale et est construite par des CP telles que Perte_PG (Cont_1 = 13,05 %), HR (Cont_1 = 14,57 %), Att_G (Cont_1 = 15,11 %), IS (Cont_1 = 20,02) et Eff_ad (Cont_1 = 21,31 %). La dimension deux (Dim_2) qui porte 22,62 % de l'inertie totale est construite à partir des contributions des CP comme Amidon (Cont_2 = 16,34 %), MG (Cont_2 = 19,91 %), PPT (Cont_2 = 22,19 %) et Proteines (Cont_2 = 27,53%).

Le cercle de corrélations formé par les deux dimensions regroupe à droite de la première dimension, l'effectif des émergences (Eff_ad), le pourcentage de pertes pondérales (Perte_PG) des grains et l'indice de susceptibilité (IS), sous lequel groupe se trouve le pourcentage d'attaque (Att_G) des grains.

A l'inverse, en corrélations négatives avec les variables du groupe précédent, se trouve la teneur en eau des grains. La deuxième dimension présente en sa partie supérieure les teneurs en amidon et en matière grasse, un peu éloigné de la teneur en polyphénols, et à l'opposé de cette dernière (partie inférieure) se trouve la teneur en protéines des grains. Les valeurs propres des deux premiers axes factoriels de l'ACP (Figure 56B) sur les variables du Tableau (24) expliquent 66,21 % d'inertie totale. Ces deux axes qui expliquent respectivement 45,12 % et 21,09 % de l'information que contiennent les onze (11) variables utilisées (Tableau 24) pourront être utilisés pour interpréter pertinemment le rôle des composés biochimiques individuels sur la sensibilité des grains au grand capucin du maïs.

Les composantes principales sont colorées (bleu à vert sur l'ACP) et retenues selon leurs contributions significatives dans la construction des deux dimensions. Certaines d'entre-elles participent significativement à la construction de la première dimension (A_Fé : Cont_1 = 9,66 % ; Perte_PG : Cont_1 = 9,71 % ; Att_G : Cont_1 = 12,14 % ; Behen : Cont_1 = 12,61 % ; IS : Cont_1 = 13,70 % et Eff_ad : Cont_1 = 16,65 %) et les autres à celle de la deuxième dimension (A_Fér : Cont_2 = 12,50 % ; Behen : Cont_2 = 12,80 % ; Palmit : Cont_2 = 13,27 % ; Arach : Cont_2 = 18,74 % et Linol : Cont_2 = 34,43 %).

Ces deux dimensions forment un cercle de corrélations qui regroupe dans un plan factoriel, des variables à droite de la première dimension, que sont l'effectif des émergences (Eff_ad), le pourcentage de pertes pondérales (Perte_PG) et de l'indice de susceptibilité (IS) des grains, au-dessus desquelles se trouve la teneur en acide palmitique (Palmit) et plus loin en bas le pourcentage d'attaque (Att_G). A l'opposé, en corrélations négatives avec les variables précédentes, nous avons la teneur en acide behénique (Behen), sous laquelle se trouvent les teneurs en amylose (Amyl) et en acide férulique (A_Fer). Dans la partie supérieure de la deuxième dimension, se trouve un groupe constitué des teneurs en acide behénique (Behen) et en acide arachidique (Arach), et plus loin, se trouve la teneur en acide palmitique (Palmit). A l'opposé de cette dernière (partie inférieure de la Dim_2), se trouvent les teneurs en acide linoléique (Linol) et acide férulique.

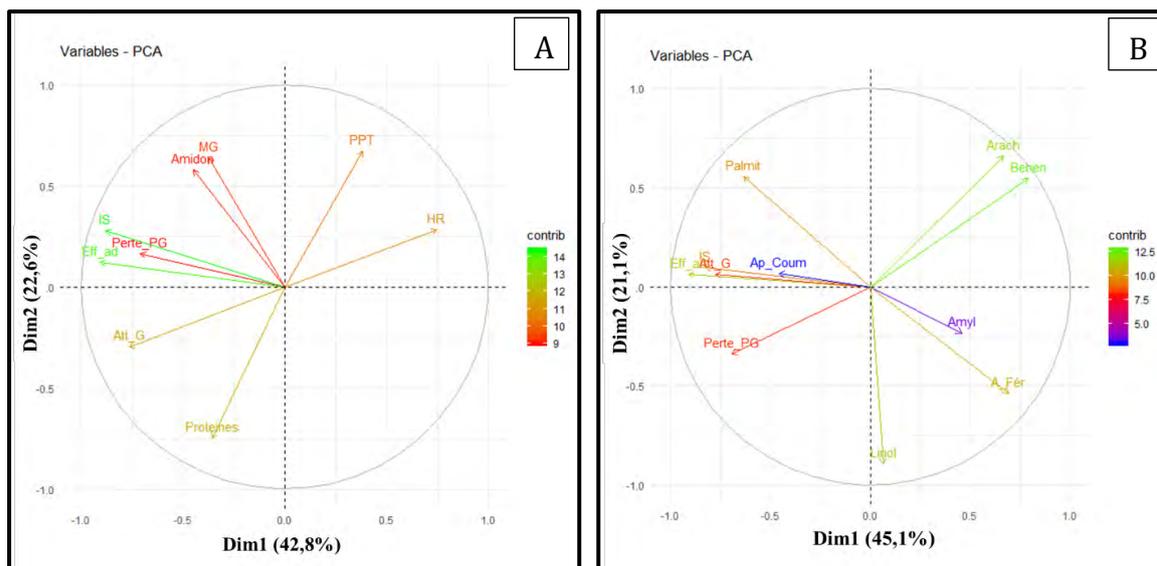


Figure 56 : ACP des paramètres de sensibilité à *P. truncatus* et biochimiques des grains

IV.2.2.2.4 Analyses Factorielles Discriminantes (AFD)

L'analyse de l'AFD (Figure 57A) suivant la première dimension (42,8 % du pouvoir discriminatoire de l'AFD) montre deux groupes de variétés en opposition. Un groupe constitué des variétés Early-Thai et Tzee-Yellow (gauche de l'axe 1), qui sont discriminées par leurs teneurs élevées en eau, leurs niveaux d'attaques, de pertes pondérales et indices de susceptibilité moins élevés. A l'opposé (droite de l'axe 1), se trouvent les variétés Synth-9243, Synth-C, Obatampa et Tzee-White qui se caractérisent par des grains à petite teneur en eau. Les trois premières ont enregistré d'énormes attaques et de pertes pondérales avec un indice de susceptibilité très élevé. La variété Tzee-White, bien qu'ayant de petites teneurs en eau, n'a pas enregistré des attaques et pertes pondérales importantes. La projection suivant la deuxième dimension (22,6 % du pouvoir discriminatoire de l'AFD), sépare deux groupes de variétés de part et d'autre de l'axe. Un groupe constitué de DMR-ES et Across-Pool (partie inférieure de l'axe 2), qui se caractérisent par une teneur élevée en protéines, et inversement de petites teneurs en matière grasse, en amidon et en polyphénols. A l'opposé (partie supérieure de l'axe 2), se trouve la variété SWAN, qui se discrimine par des teneurs très élevées en polyphénols, en amidon et en matière grasse et plus petites en protéines.

L'analyse de la Figure (57B) représentant conjointement les composés biochimiques individuels et les variétés de maïs (AFD) montre suivant la première dimension (45,1 % du pouvoir discriminatoire de l'AFD) deux variétés en opposition.

La variété Early-Thaï (gauche de l'axe 1), qui est discriminée par ses teneurs élevées en acide férulique et en amylose, contrairement à la variété Synth-C (droite de l'axe 1), qui est caractérisée par de petites teneurs en acide férulique et en amylose, et des pourcentages élevés en attaque et pertes pondérales de grains. La deuxième dimension (21,1 % du pouvoir discriminatoire de l'AFD) discrimine cinq variétés de part et d'autre de l'axe. Nous avons la variété Obatampa avec des teneurs élevées en acide palmitique et petites en amylose et en acide férulique à l'opposé de la variété SWAN, qui est caractérisée par des teneurs plus petite en acide palmitique et plus élevées en amylose et en acide férulique. Nous avons également, la variété Across-Pool (partie supérieure de l'axe 2) qui a des grains riches en acides palmitique, béhénique et arachidique et moins riches en acide linoléique. A l'opposé, nous avons les variétés Tzee-Yellow, un peu loin de Synth-9243 (partie inférieure de l'axe 2) qui sont caractérisées toutes les deux par de petites teneurs en acides béhénique et arachidique et de teneurs élevées en acide linoléique. Les variétés Tzee-White et DMR-ES ne sont pas bien discriminées vis-à-vis de leur sensibilité au grand capucin à partir de leurs constituants biochimiques individuels.

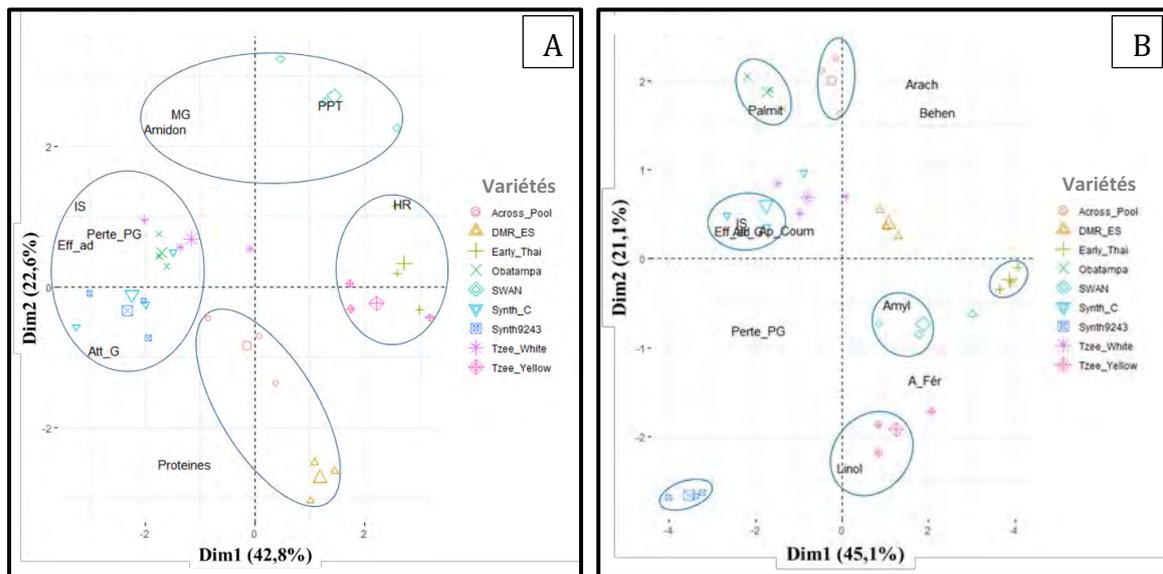


Figure 57 : AFD des variétés sur la base des composés biochimiques.

IV.2.2.3 Liaisons entres paramètres de sensibilité, morpho-physique et biochimiques

IV.2.2.3.1 Matrice de liaisons entre les paramètres de sensibilité, morpho-physique et biochimiques

L'analyse des corrélations (Tableau 25) indique de fortes corrélations négatives de l'indice de susceptibilité avec la couleur jaune ($\rho = -0,538$; $p_{(\rho)} = 0,0038$), la pureté de la couleur ($\rho = -0,526$; $p_{(\rho)} = 0,0048$), les teneurs en amylose ($\rho = -0,577$; $p_{(\rho)} = 0,0016$) et en acide béhénique ($\rho = -0,515$; $p_{(\rho)} = 0,0059$) et positives avec la teneur en acide palmitique ($\rho = 0,492$; $p_{(\rho)} = 0,0092$). L'indice de susceptibilité est aussi moyennement et positivement lié au volume des grains ($\rho = 0,405$; $p_{(\rho)} = 0,0361$) et à la teneur en matières grasses ($\rho = 0,400$; $p_{(\rho)} = 0,0389$) et négativement aux teneurs en polyphénols ($\rho = -0,451$; $p_{(\rho)} = 0,0181$) tel que l'acide férulique ($\rho = -0,485$; $p_{(\rho)} = 0,0104$). Le pourcentage de pertes pondérales est essentiellement et négativement corrélé à la teneur en acide béhénique ($\rho = -0,575$; $p_{(\rho)} = 0,0017$). L'effectif des insectes émergés en F₁ est fortement et négativement corrélé à la couleur jaune ($\rho = -0,697$; $p_{(\rho)} < 0,0001$), à la pureté de la couleur ($\rho = -0,683$; $p_{(\rho)} < 0,0001$), aux teneurs en amylose ($\rho = -0,559$; $p_{(\rho)} = 0,0025$), en acide béhénique ($\rho = -0,508$; $p_{(\rho)} = 0,0068$), en polyphénols ($\rho = -0,578$; $p_{(\rho)} = 0,0016$) particulièrement l'acide férulique ($\rho = -0,662$; $p_{(\rho)} = 0,0002$) et positivement à la teneur en acide palmitique ($\rho = 0,553$; $p_{(\rho)} = 0,0028$). Le nombre d'émergence d'insectes en F₁ est moyennement et positivement corrélé au volume du grain ($\rho = 0,400$; $p_{(\rho)} = 0,0385$), aux teneurs en amidon ($\rho = 0,428$; $p_{(\rho)} = 0,0258$) et en matières grasses des grains ($\rho = 0,450$; $p_{(\rho)} = 0,0184$) et inversement corrélé à la dureté des grains ($\rho = -0,429$; $p_{(\rho)} = 0,0255$).

Tableau 25 : Matrice de corrélations des paramètres de sensibilité, morpho-physiques et biochimiques

Variables	Eff_ad	Perte_PG	IS	b*	ΔC	Durete	Volume	Amidon	PPT	MG	Amyl	A_Fér	Palmit	Behen
Eff_ad	1													
Perte_PG	0,527**	1												
IS	0,855***	0,530**	1											
b*	-0,697***	-0,240.	-0,538**	1										
ΔC	-0,683***	-0,194.	-0,526**	0,997***	1									
Durete	-0,429*	-0,142.	-0,351.	0,533**	0,545**	1								
Volume	0,400*	0,081.	0,405*	-0,280.	-0,286.	-0,162.	1							
Amidon	0,428*	0,208.	0,468*	0,156.	0,165.	-0,260.	0,361.	1						
PPT	-0,578**	-0,093.	-0,451*	0,687***	0,684***	0,487*	-0,256.	-0,015.	1					
MG	0,450*	0,261.	0,400*	-0,181.	-0,167.	0,141.	0,564**	0,355.	-0,030.	1				
Amyl	-0,559**	-0,244.	-0,577**	0,054.	0,071.	0,339.	-0,400*	-0,749***	0,180.	-0,279.	1			
A_Fér	-0,662***	-0,254.	-0,485*	0,820***	0,822***	0,698***	-0,226.	-0,029.	0,673***	-0,096.	0,262.	1		
Palmit	0,553**	0,001.	0,492**	-0,689***	-0,709***	-0,818***	0,386*	0,236.	-0,661***	0,085.	-0,462*	-0,770***	1	
Behen	-0,508**	-0,575**	-0,515**	0,349.	0,339.	0,211.	0,005.	0,001.	0,360.	0,072.	0,378.	0,223.	-0,244.	1

"*" Significatif ; "**" très significatif ; "***" hautement significatif ; "." non significatif

IV.2.2.3.2 Analyses à Composantes Principales (ACP)

Le graphique des valeurs propres de l'ACP (Figure 58) sur les quatorze (14) variables utilisées de la matrice (Tableau 24) suggère de retenir les deux premiers axes qui expliquent respectivement 45,6 % et 19,8 % de l'information totale. Avec ces deux axes, nous avons une inertie totale de 65,4 %, qui est suffisante pour garantir une bonne interprétation des paramètres morpho-physiques et biochimiques sur la sensibilité des grains de maïs à *P. truncatus*.

Les composantes principales sont colorées (violet à vert sur l'ACP) et retenues selon leurs contributions significatives dans la construction des deux dimensions. Certaines d'entre-elles participent significativement à la construction de la première dimension (Dureté : Cont_1 = 9,24 % ; IS : Cont_1 = 9,67 % ; Palmit : Cont_1 = 10,95 % ; A_Fér : Cont_1 = 11,28 % ; Eff_ad : Cont_1 = 12,11 % ; b* : Cont_1 = 12,14 % et Δ C : Cont_1 = 12,17 %) et les autres à celle de la deuxième dimension (PPT : Cont_2 = 9,75 % ; Amyl : Cont_2 = 12,66 % ; Volume : Cont_2 = 12,67 % ; MG : Cont_2 = 17,54 % et Amidon : Cont_2 = 18,30 %).

Ces deux dimensions forment un cercle de corrélations qui regroupe dans un plan factoriel, les variables corrélées entre elles à droite de la première dimension, comme l'effectif des émergences (Eff_ad) et de l'indice de susceptibilité (IS), sous lequel groupe se trouve la teneur en acide palmitique (Palmit). A l'inverse, en corrélations négatives avec les variables du groupe précédent, se trouve un deuxième groupe constitué de la dureté, de la teneur en acide Férulique (A_Fér), de la couleur jaune (b*) et de la pureté de la couleur (Δ C) des grains.

Dans la partie supérieure de la deuxième dimension, se trouve un groupe constitué du volume des grains, des teneurs en amidon et en matière grasse (MG), et plus loin, de la teneur en polyphénols (PPT). A l'opposé de ce groupe, dans la partie inférieure, se trouve la teneur en amylose (Amyl).

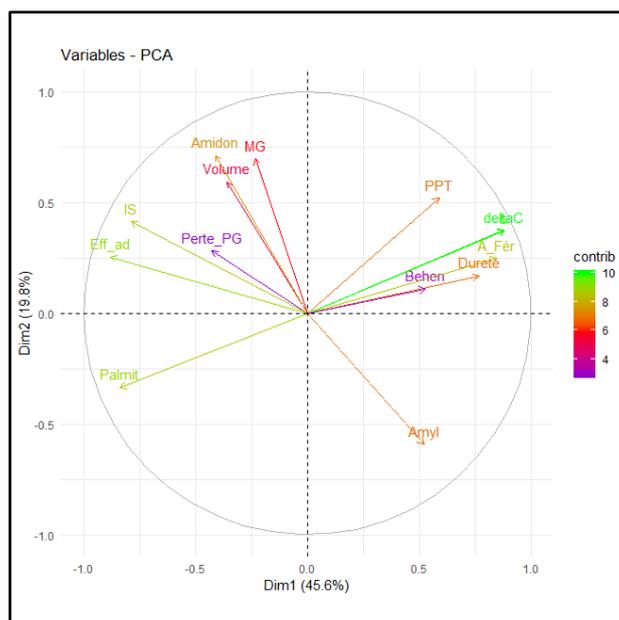


Figure 58 : ACP des paramètres de sensibilité à *P. truncatus*, morphophysiques et biochimiques des grains

IV.2.2.3.3 Analyses Factorielles Discriminantes (AFD)

L'analyse de la Figure (59) représentant conjointement les paramètres morphophysiques et biochimiques et les variétés de maïs montre suivant la première dimension (45,6 % du pouvoir discriminatoire de l'AFD) deux groupes de variétés de part et d'autre de l'axe. Le groupe constitué des variétés Obatampa, Synth-C et Synth-9243 (droite de l'axe 1), qui se caractérisent par des émergences d'insectes, des pertes pondérales et un indice de susceptibilité très élevés. Les grains de ces variétés sont de couleur blanche de moindre intensité et ont des teneurs élevées en acide palmitique. Certaines variétés ont une petite teneur en amylose et des grains volumineux (Obatampa et Synthè-C) à faible dureté (Obatampa). A l'opposé (gauche de l'axe 1), nous avons les variétés SWAN, Tzee-Yellow et Early-Thaï, qui ont enregistré peu d'émergences et de pertes pondérales avec un petit indice de susceptibilité. Ce sont des variétés qui ont des grains durs et une petite quantité en acide palmitique. Certaines parmi eux ont des teneurs très élevées en polyphénols (SWAN), en acides férulique et béhénique (Tzee-Yellow et Early-Thaï). Elles sont de couleur jaune pure (SWAN, Tzee-Yellow et Early-Thaï) avec une intensité de couleur très élevée.

L'analyse de l'AFD suivant la deuxième dimension (19,8 % du pouvoir discriminatoire de l'AFD) permet de discriminer les trois autres variétés de maïs.

Un groupe constitué des variétés Across-Pool et DMR-ES (partie inférieure de l'axe 2), qui se caractérisent par des grains riches en amylose. De façon spécifique, Across-Pool est riche en acide palmitique et DMR-ES à des grains de petite taille. A l'opposé (partie supérieure de l'axe 2), se trouve la variété Tzee-White, qui se discrimine par une forte teneur en polyphénols et une petite teneur en amylose. Toutes les trois variétés ont des grains de couleur blanche à clarté très élevée.

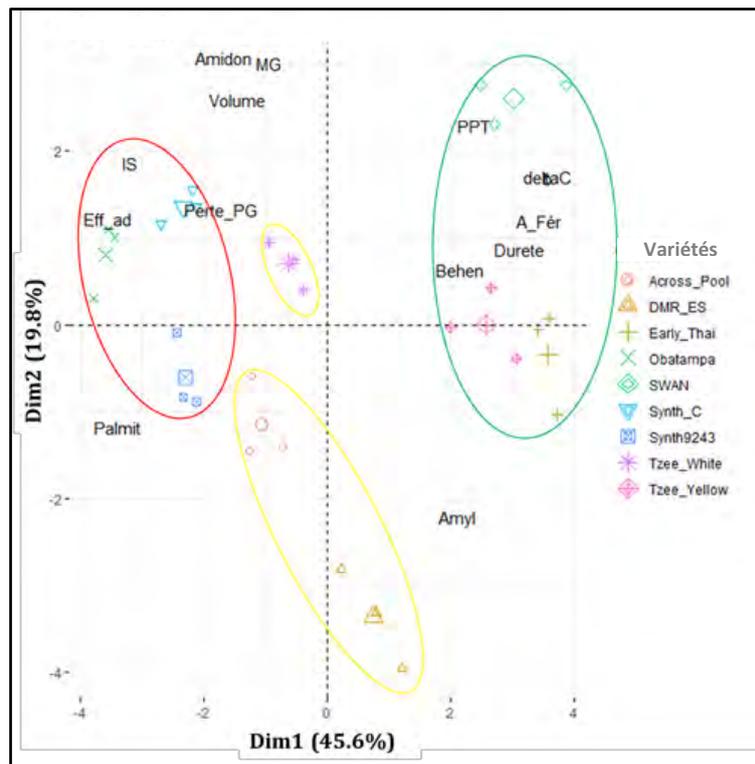


Figure 59 : AFD des variétés sur la base des paramètres morpho-physiques et biochimiques

IV.3 Discussion

La localisation et l'évaluation des aliments, des abris, des partenaires et des substrats de reproduction, ainsi que l'évitement des prédateurs et autres dangers ou tout simplement le déplacement des insectes dépendent d'un large éventail de systèmes sensoriel et visuel. Ces sens très développés chez les insectes fournissent à leur système nerveux des informations qui sont utilisées par la suite pour générer une représentation interne du monde extérieur. A partir de là, l'insecte décide et exécute une réponse comportementale et reproductive appropriée en fonction de la situation. Le maïs, de par sa large diversité en composition chimique et en structuration physique et morphologique selon la variété, influence fortement le comportement et la préférence ou l'acceptabilité du grain hôte pour l'oviposition et l'activité alimentaire de l'insecte.

Dès lors, on obtient des variétés qui peuvent être attractives ou répulsives pour l'oviposition et l'alimentation des insectes en fonction de leurs caractéristiques morpho-physiques et biochimiques spécifiques. Sur ce sens, plusieurs travaux de recherches ont décrit une résistance ou une non-préférence vis-à-vis des insectes d'un certain nombre de céréales, en particulier le maïs, sur la base des caractéristiques physiques, biochimiques et nutritionnelles des grains. Cette étude confirme ce rôle des caractéristiques du grain et évoque, en plus, un rôle majeur d'autres caractéristiques morpho-physiques sur la sensibilité du maïs suivant des mécanismes d'antibiose et d'antixénose. Globalement, les résultats de cette étude montrent que l'acceptabilité et la préférence du grain hôte par le charançon (*S. zeamais*) et par le grand capucin (*P. truncatus*) sont fortement influencées par les propriétés morpho-physiques (dureté, poids, volume, densité et les caractéristiques de la couleur du grain) et/ou biochimiques (amylose, amidon, matière grasse, humidité, polyphénols, acides gras, acide férulique, acide p-coumarique, acide béhénique, protéines brutes,...) des grains. Ce nombre élevé de paramètres jouant divers rôles dans la sensibilité des grains suggère des analyses discriminatoires (corrélations binaires et multiples) en vue d'identifier et d'éliminer ceux qui influencent moins ou pas les insectes. De cette démarche, les paramètres qui sont fortement impliqués dans la sensibilité des grains à ces deux espèces sont considérés et interprétés suivant la nature et le degré de leur implication dans les mécanismes. Les résultats montrent également que les deux espèces d'insectes étudiées présentent les performances différentes vis-à-vis des neuf variétés.

✚ Relations des caractéristiques du grain avec la sensibilité du maïs à *S. zeamais*

Le résultat des corrélations binaires et multiples indique que la sensibilité du maïs au charançon est liée à des caractéristiques morpho-physiques comme la dureté (Tableau 16 et Figure 49A) et les paramètres de la couleur du grain (Tableau 17 et Figure 49B), mais aussi à des caractéristiques biochimiques comme les teneurs en polyphénols, en protéines, en humidité (Tableau 18 et Figure 51A), en acide férulique, en acide palmitique et en acide béhénique (Tableau 19 et Figure 51B) des grains. Ces caractéristiques du grain s'impliquent dans le mécanisme de résistance de la variété à *S. zeamais* de diverses façons et à des degrés différents (Tableau 20 et Figure 53). Ainsi, on constate que la sensibilité du maïs au charançon est influencée principalement par les teneurs en polyphénols et en acide palmitique des grains (Tableau 20).

En effet, les teneurs élevées en polyphénols dans le grain diminuent fortement le nombre d'insectes émergés en F₁ ($\rho = -0,707^{***}$), les pertes pondérales ($\rho = -0,730^{***}$) et par conséquent l'indice de susceptibilité ($\rho = -0,693^{***}$) des grains. Par contre, l'acide palmitique du grain augmente avec l'émergence des insectes en F₁ ($\rho = 0,559^{**}$), les pertes pondérales ($\rho = 0,639^{***}$) et l'indice de susceptibilité ($\rho = 0,659^{***}$). D'autres caractéristiques du grain viennent secondairement pour jouer un rôle dans la réduction des pertes pondérales comme la dureté du grain ($\rho = -0,574^{**}$), la teneur en acide férulique ($\rho = -0,474^*$), la couleur jaune ($\rho = -0,465^*$) ou rouge ($\rho = -0,542^{**}$) et la pureté de la couleur ($\rho = -0,522^{**}$). L'émergence des insectes en F₁ augmentent avec les grains de couleur blanche ($\rho = 0,465^*$), mais également avec la teneur en protéines du grain ($\rho = 0,382^*$). Les teneurs élevées en acide béhénique diminuent le pourcentage d'attaque ($\rho = -0,383^*$) et l'indice de susceptibilité ($\rho = -0,454^*$) des grains (Tableau 19). Le volume, le poids (Tableau 16), l'intensité des couleurs (Tableau 17) et la teneur en amylose (Tableau 19) du grain n'ont pas une influence significative sur la sensibilité des grains au charançon en infestation sans choix.

✚ Relations des caractéristiques du grain avec la sensibilité du maïs à *P. truncatus*

Les corrélations binaires et multiples révèlent une sensibilité des grains de maïs au grand capucin qui est liée aux caractéristiques morpho-physiques tels que la dureté, le poids, le volume (Tableau 21 et Figure 55A) et les paramètres de la couleur (Tableau 22 et Figure 55B) du grain, mais aussi aux caractéristiques biochimiques comme les teneurs en polyphénols, en protéines, en humidité, en matière grasse, en amidon (Tableau 23 et Figure 57A), en acide férulique, en acide palmitique, en amylose, en acide béhénique et en acide arachidique (Tableau 24 et Figure 57B) des grains. Ces caractéristiques jouent un rôle dans le mécanisme de résistance du grain à *P. truncatus* de diverses manières et à différents degrés (Tableau 25 et Figure 59).

La sensibilité des grains de maïs au grand capucin est principalement influencée par les teneurs en amylose et en acide palmitique des grains, par la couleur jaune et la pureté de la couleur (Tableau 25). La descendance de l'insecte en F₁ est négativement affectée par la couleur jaune ($\rho = -0,697^{***}$), la pureté de la couleur ($\rho = -0,683^{***}$) et la teneur en acide férulique ($\rho = -0,662^{***}$) du grain. Le nombre d'insectes émergés est aussi négativement affecté par les teneurs en polyphénols ($\rho = -0,578^{**}$), en amylose ($\rho = -0,559^{**}$), en acide béhénique ($\rho = -0,508^{**}$) et par la dureté ($\rho = -0,429^*$) du grain.

L'indice de susceptibilité augmente inversement plus avec les teneurs en amylose ($\rho = -0,577^{**}$), la couleur jaune ($\rho = -0,538^{**}$), la pureté de la couleur ($\rho = -0,526^{**}$) et la teneur en acide béhénique ($\rho = -0,515^{**}$) qu'avec les teneurs en acide férulique ($\rho = -0,485^*$) ou en polyphénols ($\rho = -0,451^*$). Le pourcentage d'attaque des grains n'est affecté significativement qu'avec l'augmentation de la teneur en acide béhénique du grain ($\rho = -0,575^{**}$). Le nombre d'insectes émergés et l'indice de susceptibilité augmentent simultanément avec les teneurs en acide palmitique ($\rho = 0,553^{**}$ et $\rho = 0,492^{**}$ respectivement), en amidon ($\rho = 0,428^*$ et $\rho = 0,468^*$ respectivement), en matière grasse ($\rho = 0,450^*$ et $\rho = 0,400^*$ respectivement) et avec le volume ($\rho = 0,400^*$ et $\rho = 0,405^*$ respectivement) des grains. L'indice de susceptibilité augmente également avec le poids ($\rho = 0,396^*$) des grains (Tableau 21). L'intensité de la couleur influence négativement l'émergence des adultes en F_1 ($\rho = -0,500^{**}$), les niveaux d'attaque ($\rho = -0,467^*$), l'IS ($\rho = -0,409^*$) et non significativement le niveau de pertes pondérales des grains (Tableau 22). Parmi les paramètres de sensibilité des grains, il n'y a que le pourcentage d'attaqués des grains qui est influencé positivement par la couleur blanche ($\rho = 0,473^*$) et négativement par la couleur jaune ($\rho = -0,482^*$) du grain (Tableau 22). Le niveau d'attaque des grains augmente également avec la teneur en protéines ($\rho = 0,394^*$) des grains (Tableau 23). L'amylose des grains n'influence pas significativement les niveaux d'attaques et de pertes des grains (Tableau 24).

Mécanismes de résistance des variétés contre des deux espèces d'insectes

Les variétés résistantes (Early-Thaï, DMR-ES et Tzee-Yellow), modérément résistantes (SWAN, Across-Pool et Tzee-White) et susceptibles (Synth-9243, Synth-C et Obatampa) à *P. truncatus* ont des caractéristiques morpho-physiques et biochimiques différentes qui les confèrent une certaine performance ou vulnérabilité à l'infestation de l'insecte. Cependant, certaines de ces caractéristiques ne les confèrent pas une résistance aussi efficace contre *S. zeamais*. Ainsi, une variété modérément résistante (SWAN), cinq variétés susceptibles (Tzee-White, Tzee-Yellow, Across-Pool, DMR-ES et Early-Thaï) et trois variétés hautement susceptibles (Obatampa, Synth-C et Synth-9243) au charançon du maïs sont identifiées.

✓ Les variétés face à l'infestation par *S. zeamais*

◦ SWAN (variété modérément résistante) : sur les neuf variétés de maïs testées à une infestation sans choix par *S. zeamais*, seule une variété est résistante (SWAN). Cette résistance peut être expliquée par des caractéristiques spécifiques à ses grains comme la dureté élevée (Figure 49A), la pureté de la couleur jaune (Figure 49B) et la teneur élevée en composés phénoliques (Figure 51A), en particulier, en acide férulique (Figure 51B). Ce résultat corrobore ceux de Dobie (1974) et de Schoonhoven *et al.* (1976) qui indiquent que la sensibilité des grains de maïs à l'infestation de *S. zeamais* est inversement proportionnelle à la dureté des grains. La dureté du grain a été signalée également comme principal facteur de résistance contre *Sitophilus oryzae* (Bamaiyi *et al.*, 2007). Les composés phénoliques, omniprésents dans les grains de maïs, à la fois sous forme libre et sous forme liée, jouent un rôle majeur dans la structure de la paroi cellulaire et par conséquent dans la défense des grains contre les déprédateurs. En effet, constitués essentiellement de deux acides phénoliques (acides férulique et para-coumarique) présents principalement dans les couches du péricarpe et à aleurone (Adom & Liu, 2002 ; De la Parra *et al.*, 2007), les polyphénols sont considérés comme de bons indicateurs pour une résistance des grains aux insectes (Santiago & Malvar, 2010 ; García-Lara & Bergvinson, 2014). En particulier, les travaux antérieurs ont indiqué qu'une teneur élevée en composés phénoliques du grain augmente avec la résistance du maïs contre *S. zeamais* (Serratos *et al.*, 1987 ; Classen *et al.*, 1990 ; Arnason *et al.*, 1992). Le rôle des polyphénols dans le mécanisme de résistance du grain est pratiquement lié à la fois à des actions d'antixénose des tissus de surface (barrières structurelles) et à des actions d'antibiose tels que l'anti-appétence et les propriétés toxiques de leur forme libre (Classen *et al.*, 1990 ; Arnason *et al.*, 1992 ; García-Lara *et al.*, 2004). L'action de l'acide férulique, composé majoritaire des acides phénoliques du grain de maïs (Bauer *et al.*, 2012 ; García-Lara & Bergvinson, 2014 ; Zhang *et al.*, 2017), est très accentuée sur *S. zeamais* (Philogène & Arnason, 1995). En fait, l'acide férulique qui est lié de manière covalente aux parois cellulaires de la couche à aleurone et du péricarpe par des liaisons esters, créent une résistance mécanique (dureté du grain) qui limite l'infestation des grains (Arnason *et al.*, 1994 ; Ishii, 1997 ; Bily *et al.*, 2003) par *S. zeamais*. En plus de cette action physique, il est mentionné aussi que les amides d'acide phénolique, localisées dans la couche à aleurone, telles que la diféruloylputrescine et la di-p-coumaroylputrescine sont des composés dissuasifs contre les insectes (Sen *et al.*, 1994 ; Arnason *et al.*, 1997 ; Bily *et al.*, 2003).

Une possible inhibition des neurorécepteurs dépendants du glutamate (neurotransmetteur) chez les insectes a été suggérée par Fixon-Owoo *et al.* (2003), même si les mécanismes et les déterminants de cette inhibition sont encore inconnus. Les polyphénols sont également considérés comme composés endommageant les cellules de l'intestin moyen des insectes (Kevin, 2002).

En résumé, ce travail indique que la variété SWAN semble avoir une action antixénose basée sur un effet répulsif physique (dureté des grains) et une action antibiose impliquant des anti-appétents biochimiques et des propriétés toxiques de la forme libre des polyphénols sur l'oviposition et l'alimentation du charançon du maïs.

◦ Tzee-Yellow, Early-Thaï, Tzee-White, DMR-ES et Across-Pool (variétés sensibles)

Les variétés Tzee-Yellow et Early-Thaï se caractérisent par des grains durs (Figure 49A) de couleur jaune à pureté élevée (Figure 49B). Ces deux variétés, bien qu'ayant de grains jaunes, elles sont plus sensibles que la variété SWAN, qui est protégée mieux par sa teneur élevée en polyphénols. Tzee-White, DMR-ES et Across-Pool se caractérisent en commun par des grains de couleur blanche à pureté et intensité élevées (Figure 49B). De façon spécifique, la teneur en polyphénols élevée de Tzee-White (Figure 51A) la rend moins vulnérable malgré ses grains qui ont une faible dureté (Figure 53). Les variétés DMR-ES et Across-Pool bien que leurs teneurs en protéines soient élevées (Figure 51A), elles ne sont pas trop sensibles, ce qui serait dû à leurs teneurs élevées en acide béhénique et en acide arachidique (Figure 51B).

◦ Obatampa, Synth-C, et Synth-9243 (variétés hautement susceptibles)

Toutes les trois variétés sont riches en acide palmitiques et ont des grains de couleur blanche à faible intensité.

Obatampa, la variété la plus vulnérable à l'infestation de *S. zeamais*, enregistre le plus grand nombre d'émergences d'adultes en F₁, avec d'énormes pertes pondérales de grains. Cette sensibilité serait due particulièrement à sa petite teneur en polyphénols, ses grains particulièrement mous et à ses fortes teneurs en acide palmitique. La constitution physico-chimique des grains de cette variété représente un support alimentaire nutritif important dans le régime alimentaire des insectes. Des études antérieures ont mentionnées que les acides gras, en particulier l'acide palmitique, attirent les insectes (Roy & Barik, 2014).

Ces acides gras représentent pour ces insectes une valeur nutritionnelle et fonctionnelle considérable (Yeo *et al.*, 2013; Youn *et al.*, 2012; Sinclair & Marshall, 2018). Womeni *et al.* (2009) avaient trouvé des quantités très élevées d'acides gras (53,75% dont 45,46% d'acide linoléique) dans les larves du charançon de raphia (*Rhynchophorus phoenicis*).

En effet, en plus d'être une ressource énergétique et structurelle (composants majeurs des membranes cellulaires, conférant une fluidité) nécessaire au maintien de la vie, les insectes en développement ont besoin d'accumuler une grande quantité de réserves en acides gras pour la phase de diapause (période à laquelle aucun aliment ne sera disponible)(Hahn & Denlinger, 2011). Pour leur survie et leur reproduction, les insectes doivent détecter des informations volatiles spécifiques dans un environnement chimique simple ou très compliqué. L'odorat de ces acides, si faible soit-il, peut être détecté par l'insecte grâce à son système olfactif périphérique très élaboré (antennes, palpes maxillaires, palpes labiales,...) avec d'énormes neurones sensoriels olfactifs et des structures spécialisées pour la détection des molécules odorantes (Schneider, 1964). Les odeurs sont d'une importance capitale pour la plupart des insectes (Dethier, 1947), car elles orientent leurs stratégies de survie et de développement. La teneur élevée en amidon des grains fait également de cette variété un bon aliment nutritif pour *S. zeamais* si nous nous référons aux travaux de Osipitan *et al.* (2012).

La variété Synth-C, au-delà de sa forte teneur en acide palmitique, a une forte teneur en protéines et une petite teneur en eau. En effet, ce travail montre que la teneur en protéines des grains augmente avec l'effectif des adultes de *S. zeamais* émergés en F₁ (Tableau 18). Cela indique que les protéines du grain favorisent la multiplication de *S. zeamais*, engendrant ainsi d'énormes pertes pondérales de grains. Ce résultat est en concordance avec les études précédentes, qui mentionnent que la teneur en protéines augmentait avec la sensibilité du maïs à *Sitophilus zeamais* M. (Osipitan *et al.*, 2012 ; Fourar-Belaifa & Fleurat-Lessard, 2015) et à la teigne du grain d'Angouillois, *Sitotroga cerealella* O. (Yadu *et al.*, 2000). Cependant, d'autres études rapportent que la famille zéines des protéines était positivement corrélée à la dureté des grains du maïs (Dombrink-Kurtzman & Bietz, 1993 ;Eyherabide *et al.*, 1996 ;Robutti *et al.*, 1997). Le rôle majeur qu'ont joué les protéines dans cette étude suggère une analyse plus détaillée pour identifier et quantifier les différentes familles de protéines présentes dans ces variétés en vue d'analyser leur implication dans l'alimentation et l'oviposition du charançon.

La petite teneur en eau de ses grains a dû favoriser également le développement de *S. zeamais* comme l'avaient indiqué Arnason *et al.* (1994).

Synth-9243, outre sa forte teneur en acide palmitique, cette variété contient la plus petite teneur en polyphénols après Obatampa. Cette constitution chimique des grains pourrait expliquer la sensibilité de cette variété en favorisant la ponte des adultes et l'alimentation des larves du charançon.

- ✓ Les variétés face à l'infestation par *P. truncatus*
 - DMR-ES, Early-Thai et Tzee-Yellow (variétés résistantes).

Early-Thai et Tzee-Yellow se caractérisent principalement par des teneurs élevées en eau (Figure 57A) en acides férulique et béhénique (Figure 57B), des grains durs en couleur jaune pure (Figure 59). La variété DMR-ES est caractérisée par des grains de petite taille, mais riches en amylose (Figure 59).

Pour cette variété (DMR-ES), la teneur élevée en amylose impacte négativement la reproduction du grand capucin du maïs. Elle constitue une ressource nuisible aux activités alimentaires des larves de *P. truncatus*. En fait, les larves de *P. truncatus* ont une capacité digestive de l'amylose très réduite en raison de leur faible quantité d' α -amylase (enzymatique digestive de l'amylose) (Mendiola-Olaya *et al.*, 2000). Par ailleurs, Peters *et al.* (1972) avaient mentionné qu'une teneur élevée en amylose du grain réduirait les dommages du maïs stocké grâce à la nuisance de l'amylose sur les larves des insectes. Cependant, les adultes de *P. truncatus* ne semblent pas avoir les mêmes contraintes alimentaires que ses larves vis-à-vis de l'amylose du grain. La corrélation non significative de la teneur en amylose avec les pourcentages d'attaques et de pertes de poids des grains (Tableau 24) suggère que la teneur élevée en amylose n'a pas d'effet anti-nourrissant significatif sur les adultes. Ainsi, nous constatons que certaines variétés modérément résistantes (Across-Pool et Tzee-White) ont subi plus de dommages que d'autres qui sont classées sensibles (Obatampa et Synth-C). Ces résultats sont en concordance avec les travaux de Mendiola-Olaya *et al.* (2000) qui avaient enregistré une importante activité enzymatique d' α -amylase chez les adultes de *P. truncatus*, contrairement chez les larves. Dans ce sens, ce travail estime que les adultes de *P. truncatus* sont plus compétents sur le maïs riche en amylose que ses larves et cela serait dû à leurs importantes quantités d' α -amylase digestive qui leur confère une bonne capacité digestive de l'amylose.

La dureté du grain, considérée auparavant comme un bon indicateur de résistance du maïs aux insectes (Santiago & Malvar, 2010), sert de résistance mécanique (action antixénose) pour ces variétés. Cette dureté, qui augmente avec la teneur en amylose (Dombrink-Kurtzman & Bietz, 1993) a été rapportée comme l'une des sources de résistance du maïs à *P. truncatus* (Meikle *et al.*, 1998 ; Kevin, 2002).

La couleur, la clarté, l'intensité et la pureté de la couleur des grains représentent un des facteurs importants dans ce travail, influençant fortement la préférence et l'acceptabilité de la variété par l'insecte. Les grains de clarté et de pureté de couleur très élevées sont les moins sensibles. Il est constaté également dans ce travail, plus le grain s'intensifie en couleur jaune, rouge ou blanche, plus il exerce un effet répulsif vis-à-vis de l'insecte. La couleur est un attribut perceptif important en alimentation, renseignant sur la nature et la composition de la ressource alimentaire (De Groote *et al.*, 2017). Elle oriente ainsi la préférence de la consommation des humains ainsi que ceux des insectes. Il est établi que la dispersion des insectes et la localisation de leurs aliments, hôtes, sites de repos et sites de ponte sont tous régis par la vision (Shimoda & Honda, 2013 ; Saunders, 2013) et varient selon les espèces (Johansen *et al.*, 2011 ; Grunsven *et al.*, 2014). Sur la base de leurs récepteurs visuels, les insectes peuvent identifier et sélectionner la taille ou la couleur des grains hôtes de leur préférence (Arnold *et al.*, 2015 ; Kim *et al.*, 2019).

La forte liaison entre la teneur en polyphénols et la pureté de la couleur laisse penser que cette dernière serait un indicateur visuel pour l'insecte d'une quantité élevée de polyphénols dans le grain. Cependant, une étude plus poussée dans ce sens serait intéressante pour mieux cerner le rôle des caractéristiques de la couleur sur les stratégies de sélection des grains hôtes par l'insecte.

En résumé, la combinaison de ces deux mécanismes, antixénose par effet répulsif morpho-physique (couleur, dureté et taille du grain) et antibiose par anti-appétence et toxicité biochimique (amylose, acide béhénique,..) implique des interactions et modifications structurales complexes qui conduisent à une accessibilité et une acceptabilité limitées des grains, mais aussi à une toxicité alimentaire pour l'insecte (López-Castillo *et al.*, 2018) chez ces trois variétés de maïs.

◦ Across-Pool, SWAN et Tzee- White (variétés modérément résistantes).

Ces trois variétés de maïs à résistance modérée présentent des caractéristiques spécifiques pour chacune d'elles.

La variété Across-Pool est caractérisée par ses teneurs élevées en protéines (Figure 57A) en acides palmitique, béhénique et arachidique (Figure 57B), qui sont des composés agissant de manière antagoniste à l'infestation par *P. truncatus*. En effet, ces travaux montrent que la teneur en protéines augmente avec le pourcentage de grains attaqués par *P. truncatus* (Tableau 23). Cela pourrait signifier que l'activité alimentaire et destructrice des adultes de *P. truncatus*, qui est la cause majeure des pertes pondérales du maïs stocké (Holst *et al.*, 2000), est favorisée par le contenu nutritionnel des variétés de maïs. Bien que les protéines et l'acide palmitique soient favorables au développement d'insecte, les teneurs élevées en acides béhénique et arachidique constituent un atout pour cette variété car elles influenceraient négativement l'oviposition et l'activité alimentaire du grand capucin du maïs.

La variété SWAN se caractérise par des grains jaunes, durs, riches en polyphénols et un poids élevé. La résistance du maïs par les composés phénoliques (acide férulique et p-coumarique) basée sur des mécanismes d'antixénose (couleur et dureté des grains) et d'antibiose (anti-appétence et toxicité des formes libres) (Serratos *et al.*, 1987 ; Sen *et al.*, 1994), présente une nuisance modérée sur *P. truncatus* (Philogène & Arnason, 1995). La variété SWAN a un mécanisme de résistance basé sur des barrières physiques et des nuisances biochimiques des polyphénols, qui se révèle modérément efficace contre la ponte et l'alimentation du grand capucin du maïs, confirmant l'affirmation précitée.

La variété Tzee-White a des grains mous, riches en composés phénoliques avec une petite teneur en eau. Cette quantité importante de polyphénols devrait pouvoir la rendre résistante contre *P. truncatus* ; cependant, la petite teneur en humidité et la faible dureté de ses grains ont dû favoriser l'oviposition de l'insecte et réduire fortement le temps de développement médian en vue de le permettre de minimiser la mortalité larvaire due aux polyphénols libres.

Les variétés SWAN et Tzee-White, bien que leur teneur en composés phénoliques soit largement supérieure à celle des variétés DMR-ES, Early Thai et Tzee-Yellow, leur indice de susceptibilité est 2 fois inférieur à celui de ces trois variétés. Cela montre que, même si la teneur en composés phénoliques est considérée comme un bon indicateur de résistance, elle ne peut à elle seule protéger efficacement les grains de maïs contre *P. truncatus*.

- Synth-C, Synth-9243 et Obatampa (variétés sensibles).

Ces trois variétés de maïs ont en commun une forte teneur en acide palmitique, une petite teneur en amylose et des caractéristiques spécifiques pour chacune d'elles. Cependant, leur vulnérabilité serait majoritairement due à la petite teneur en amylose et à la forte teneur en acide palmitique de leurs grains. Pour Obatampa, outre la forte teneur en acide palmitique, cette variété se compose de grains plus mous, ce qui la rend particulièrement vulnérable. La variété Synth-C, qui contient les grains les plus volumineux, très riches en protéines, constitue un support alimentaire favorable au développement et à la multiplication de *P. truncatus*. Dobie et Kilminster (1978) ont décrit les protéines comme un élément nutritif important dans le régime alimentaire des insectes nuisibles. Les protéines du maïs, en particulier les acides aminés, la lysine et le tryptophane constituent des éléments nutritifs importants pour *P. truncatus* (Adem & Bourges, 1981 ; Torreblanca *et al.*, 1983). Le volume du grain constitue également un facteur stimulateur de l'oviposition des femelles de *P. truncatus* (Ngom & Sembène, 2020). Puisqu'elles déposent plusieurs œufs dans un grain, les gros grains assureraient la disponibilité de nourriture à l'ensemble des larves qui sont dans le grain jusqu'à leur émergence.

Bien que des études comparables sur la sélection du grain hôte en fonction de sa taille pour cette espèce soient peu nombreuses, les travaux de De Groot *et al.* (2017) ont indiqué que *P. truncatus* cause plus de dommages sur les grains de petite taille que sur ceux de grande taille, mais avec une différence non significative. Son résultat serait influencé par les colorants alimentaires recouvrant les grains, qui ont aussi une forte influence sur le choix alimentaire de *P. truncatus*.

CONCLUSION PARTIELLE

La résistance de l'hôte, une des meilleures stratégies de lutte contre les déprédateurs, est très souvent suggérée dans les pays en voies de développement pour une protection efficace et respectueuse de l'environnement des denrées alimentaires. Cette résistance qui est basée essentiellement sur des facteurs d'antibiose et d'antixenose diffère d'une variété à l'autre suivant leurs caractéristiques morphologiques, physiques et biochimiques. L'identification de ces caractéristiques permet de faire un choix variétal qui réduirait les pertes post-récolte par usage de variétés contenant mieux des indicateurs de résistance, mais aussi d'améliorer la résistance des variétés à haute rendement. Ce travail a permis d'identifier les caractéristiques morpho-physiques et biochimiques du grain qui sont associées à la sensibilité du maïs à l'infestation de *S. zeamais* et de *P. truncatus*. Malgré leur complexité biochimique et structurelle, les grains de maïs n'échappent aux dommages causés par ces insectes granivores qu'avec un certain nombre de critères précis. Les caractéristiques du grain les plus déterminant dans la sensibilité des variétés évaluées sont la dureté, le volume, la couleur, les teneurs en polyphénols, en acide palmitique et en amylose. La variété de maïs qui résiste mieux à l'infestation du grand capucin est celle qui a des grains durs avec des teneurs élevées en amylose et en polyphénols. Alors que pour le charançon, la teneur élevée en polyphénols et les grains durs constituent les principaux indicateurs d'une variété qui résiste mieux à son infestation. La sensibilité de la variété à l'infestation de ces espèces augmente fortement avec la teneur en acide palmitique de ses grains et inversement avec la clarté et la pureté de la couleur des grains. La teneur en amylose exerce une forte nuisance sur le grand capucin, par contre ne montre aucun effet significatif sur le charançon.

CONCLUSION GENERALE

Les insectes ravageurs des stocks, en particulier les Coléoptères comme *S. zeamais* et *P. truncatus* occasionnent d'énormes pertes sur les produits entreposés et constituent une des contraintes majeures pour une sécurité alimentaire et nutritionnelle des pays en voies de développement. Ces derniers, appelés à activer tous les leviers pour relever le défi de la disponibilité permanente de nourriture pour leurs populations, consacrent d'énormes efforts sur la gestion des denrées stockées. Force est de constater malgré tous les efforts fournis sur des stratégies innovantes de protection jugées satisfaisantes, que le contexte d'insécurité alimentaire est toujours marqué par des pertes élevées en stockage. Dans ce contexte, l'usage de variétés moins sensibles aux infestations des insectes de stock serait une alternative à la fois efficace, simple et accessible aux producteurs, quels que soient leurs moyens financiers. En effet, c'est une nouvelle stratégie qui fait l'objet de plusieurs recherches scientifiques dans beaucoup de pays. C'est dans ce sens que ce travail s'est fixé comme objectifs d'évaluer le niveau de sensibilité de l'ensemble des variétés de maïs homologuées et cultivées au Sénégal et d'expliquer cette sensibilité sur la base des caractéristiques morphologiques, physiques et biochimiques des grains. En résumé, l'étude montre que ces deux Coléoptères, *S. zeamais* et *P. truncatus*, bien reconnus au Sénégal pour leur voracité sur le maïs, infestent les neuf variétés testées, bien qu'à des degrés significativement différents. Ainsi, ce travail permet d'affirmer, à travers les performances de certaines variétés vis-à-vis des insectes, que la résistance des variétés hôtes peut constituer une alternative efficace pour la lutte antiparasitaire intégrée. Cette étude a permis d'identifier parmi les neuf variétés testées, quelques-unes qui sont résistantes et capables de maintenir les pertes associées à ces insectes à des niveaux de pertes économiques acceptables. Globalement, les variétés sont plus sensibles à l'infestation de *S. zeamais* qu'à celle de *P. truncatus*. Certaines variétés (DMR-ES, Tzee-Yellow et Early-Thaï) qui se révèlent résistantes contre *P. truncatus* sont par contre sensibles à l'infestation de *S. zeamais*. La variété la plus résistante contre *S. zeamais* est SWAN, alors que celles les plus résistantes contre *P. truncatus*, sont Early-Thaï, DMR-ES et Tzee-Yellow. Ces variétés constituent les hôtes les moins favorables pour le développement des insectes, réduisant significativement leurs capacités reproductives. Les variétés Obatampa, Synth-C et Synth-9243, constituent les variétés les plus sensibles et plus favorables pour les deux espèces, présentant un risque de pertes élevées du maïs en stockage de longue durée.

Les paramètres morpho-physiques et biochimiques associés à cette résistance sont essentiellement les teneurs en polyphénols, en amylose, en acide palmitique, en acide béhénique, la dureté, la couleur et le volume des grains. Le maïs le plus résistant contre le grand capucin du maïs peut être décrit comme une variété avec des grains durs à teneur élevées en amylose et en polyphénols. Quant au profil du maïs résistant contre le charançon du maïs, la teneur élevée en polyphénols et les grains durs sont les principaux indicateurs. La sensibilité de la variété à l'infestation de ces espèces augmente fortement avec la teneur en acide palmitique de ses grains.

- **Recommandations**

1. Les variétés Early-Thaï, DMR-ES et Tzee-Yellow présentant un bon profil de tolérance à *P. truncatus* sont recommandées par cette étude comme variétés potentielles à utiliser pour réduire les pertes post-récolte du maïs dues à cette espèce.
2. La variété SWAN est particulièrement recommandée par l'étude comme un moyen écologique de réduire les pertes de maïs liées à l'infestation de *S. zeamais*.
3. Les grains de maïs infestés par l'une des espèces perdent la quasi-totalité de leur pouvoir germinatif et ne doivent plus par conséquent faire l'objet de semence.
4. Les programmes et structures de sélection des semences doivent désormais miser sur les variétés à teneurs élevées en polyphénols et en amylose, deux composés protecteurs des grains et jouant un rôle majeur dans l'organisme du consommateur.

- **Perspectives de recherche**

1. Evaluer la réponse olfactive des insectes vis-à-vis des composés biochimiques identifiés comme facteurs clés de la sensibilité variétale en vue de mieux connaître leur degré d'acceptabilité et leurs doses létales et/ou répulsives pour chaque espèce (en cours).
2. Caractériser les composés organiques volatils (COV) des grains de maïs afin d'évaluer la nature de leur action sur la réponse olfactive des insectes (en cours).
3. Mesurer la composition chimique (acides gras, composés volatils, protéines, amylose, ...) des larves des deux espèces en vue d'évaluer les raisons physiologiques de leur préférence variétale.

4. Evaluer la sensibilité variétale du maïs à l'infestation simultanée de ses deux principaux ravageurs, *Sitophilus zeamais* et de *Prostephanus truncatus*.
5. Au-delà de cette étude sur les ravageurs des stocks, il est nécessaire d'évaluer les performances agronomiques (sensibilité aux maladies et aux ravageurs de la plante au champ) des variétés résistantes.
6. Utiliser ces variétés résistantes dans des croisements avec de variétés à haut rendement en vue de produire de nouvelles variétés à la fois résistantes et productives.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abass, A. B., Ndunguru, G., Mamiro, P., Alenkhe, B., Mlingi, N., & Bekunda, M. (2014). Post-harvest food losses in a maize-based farming system of semi-arid savannah area of Tanzania. *Journal of Stored Products Research*, 57, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2013.12.004>
- Abebe, F., Tefera, T., Mugo, S., Beyene, Y., & Vidal, S. (2009). Resistance of maize varieties to the maize weevil *Sitophilus zeamais* (Motsch.) (Coleoptera: Curculionidae). *African Journal of Biotechnology*, 8(21), 5937–5943. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0034946764&partnerID=40&md5=25a3b3783a748cf70941e2babba73533>
- Adams, R.E., Wolfe, J.E., Milner, M., & Shellenberger, J.A. (1953). Aural Detection of Grain Infested Internally with Insects. *Science*, 118(3058), 163–164.
- Adem, E. & Bourges, H. (1981). Cambios en la concentration de algunos componentes del grano de maize infestado por *Prostephanus truncatus* Horn, *Sitophilus zeamais* Mots, and *Sitotroga cerealella*, Oliver. *Archs Lat. Am. Nutr.*, 31, 270-286.
- Adjile, A. (2012). Les acquisitions massives de terre agricoles, entre opportunités et menaces pour la paysannerie familiale : étude de cas au Sud et Centre. *Bénin, Cotonou, CEBEDES*, 149 p.
- Adler, C. (1994). Comparaison of the efficacy of CO₂- rich and N₂-rich atmosphere against the granary weevil *Sitophilus granaries* (L.) (Coleoptera: Curculionidae). In: *Higley E., Wright E.J., Banks H.J. & Champ B.R. (Edit.): Stored Product Protection, Proc. 6th Inter. Work. Conf. Stored Prod. Prot. Canberra*, 11-15.
- Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002). Antioxidant Activity of Grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(21), 6182–6187.
- Adom, K.K., Sorrells, M.E., & Liu, R. H. (2003). Phytochemical Profiles and Antioxidant Activity of Wheat Varieties. *J. Agric. Food Chem*, 51(26), 7825–7834.
- AFNOR. (1982). Recueil de normes françaises des produits dérivés des fruits et légumes, jus de fruits. In *“Recueil de Normes Françaises”*, Ed. AFNOR, Paris, France., 1^{re} éd, 328 p.
- Agbaka, A., Sohounhloue K.D., Dockoïmo, B.E., Djossou L., & Foua-Bi, K. (1999). Contribution à la lutte intégrée contre *Prostephanus truncatus* (Horn) Coleoptera: Bostrichidae), par l'utilisation d'huiles essentielles. *J. SOACHIM*, 008, 87–95.

- Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie(ANSD). (2014). Rapport définitif RGPFAE 2013. *ANSD-AGRICULTURE*, 12, 30 p.
- Agès, J. P. (2004). Analyse factorielle de données mixtes. *Revue de Statistique Appliquée*, Tome 52(4), 93–111.
- Ahagnier, B. E. C., Oger, C. A. R. E., Hiloge, B. E. J. R. P., Ne, Å., & Olard, D. A. R. I. (2003). Possible Role of Plant Phenolics in the Production of Trichothecenes by *Fusarium graminearum* Strains on Different Fractions of Maize Kernels. *J. Agric. Food Chem.*, 51(9), 2826–2831. <https://doi.org/10.1021/jf020957g>
- Akin, D. E. (1995). Microspectrophotometric characterization of aromatic constituents in cell walls of hard and soft wheats. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 68(2), 207–214. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740680212>
- Albert, H. (1992). Aspects économiques de la protection des stocks - Exemple du maïs dans le sud du Togo. *GTZ Hamburg*, 150 p.
- Almeida Rios, S., Dias Paes, M. C., Cardoso, W. S., Borém, A., & Teixeira, F. F. (2014). Color of Corn Grains and Carotenoid Profile of Importance for Human Health. *American Journal of Plant Sciences*, 05(06), 857–862. <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.56099>
- Amen, M., Peter, S., & Shorai, D. (2015). Evaluation of CIMMYT drought tolerant maize germplasm for resistance to weevil (*Sitophilus zeamais* Motschulky) damage. *African Journal of Agricultural Research*, 10(45), 4150–4158. <https://doi.org/10.5897/ajar2015.10252>
- Amen, R. D. (1968). A model of seed dormancy. *The Botanical Review*, 34(1), 1–31.
- Amoo, I.A. (1998). Estimation of crude proteins in some Nigerians foods. *J. Appl. Sci.*, 1, 65–72.
- Anagnostopoulou, M.A., Kefalas, P., Papageorgiou V.P., Assimopoulou, A.N., & Boskou, D. (2006). Radical scavenging activity of various extracts and fractions of sweet orange peel (*Citrus sinensis*). *Food Chemistry.*, 94, 19-25.
- Anderson, T.J. & Lamsal, B.P. (2011). Zein Extraction from Corn , Corn Products , and Coproducts and Modifications for Various Applications : A Review. *Cereal Chem.*, 88(2), 159–173.
- Andreasen, M.F., Kroon, P.A., Williamson, G., & Garcia-Conesa, M.T., (2001). Intestinal release and uptake of phenolic antioxidant diferulic acids. *Free Radic Biol Med.*, 31(3), 304-314.

- Anonyme. (2009). Directive 2009/128/CE instaurant un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatibles avec le développement durable. *Bruxelles: Commission Européenne*.
- Appert, J. (1992). Le stockage des produits vivriers et semenciers. *Maisonneuve et Larose, 1*, 98 p.
- Appleby, J.H., & Credland, P.F. (2003). Variation in responses to susceptible and resistant cowpeas among west African populations of *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Bruchidae). *J. Econ. Entomol.*, 96(2), 489-502.
- Arbogast, R.T. (1985). Biological control of stored product insects: Status and prospects. *In: BAUR, T.J. (Ed.): Insect Management for Food Storage and Processing. MCC, St. Paul, Minnesota, 2.Auflage, 226-238*.
- Arnason, J. T., Lambert, J. D.H., Gale, J., Mihm, J., Bjarnason, M., Jewell, D., Serratos, J. A., Fregeau-Reid, J., Pietrzak, L. (1993). Is "quality protein" maize more susceptible than normal cultivars to attack by the maize weevil *Sitophilus zeamais*? *Postharvest Biology and Technology*, 2(4), 349-358. [https://doi.org/10.1016/0925-5214\(93\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0925-5214(93)90039-6)
- Arnason, J.T., Baum, B., Gale, J., Lambert, J.D.H., Bergvinson, D., Philogene, B.J.R., Serratos, J.A., Mihm, J., Jewell, D.C. (1994). Variation in resistance of Mexican landraces of maize to maize weevil *Sitophilus zeamais*, in relation to taxonomic and biochemical parameters. *Euphytica.*, 74, 227-236.
- Arnason, J.T., Gale, J., Conilh de Beyssac, B., Sen, A., Miller, S.S., Philogene, B.J.R., Lambert, J.D.H., Fulcher, R.G., Serratos, A., Mihm, J. (1992). Role of phenolics in resistance of maize grain to the stored grain insects, *Prostephanus truncatus* (Horn) and *Sitophilus zeamais* (Motsch.). *J Stored Prod Res*, 28(2), 119-126.
- Arnold, S. E. J., Stevenson, P. C., & Belmain, S. R. (2015). Responses to colour and host odour cues in three cereal pest species, in the context of ecology and control. *Bulletin of Entomological Research*, 105(4), 417-425. <https://doi.org/10.1017/S0007485315000346>
- Arranz, S., & Calixto, F.S. (2010). Analysis of polyphenols in cereals may be improved performing acidic hydrolysis: A study in wheat flour and wheat bran and cereals of the diet. *Journal of Cereal Science*, 51(3), 313-318.
- Ashmore, J. (2008). Cochlear outer hair cell motility. *American Physiological Society*, 88(1), 173-210. <https://doi.org/10.1152/physrev.00044.2006>.

- Association of Official Analytical Chemists (AOAC) International. (1984). Official Methods of Analysis. *14th Edition, Arlington, VA, USA.*
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC) International. (1990). Official Methods of Analysis. *15th Edition, Arlington, VA, USA.*
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC) International. (2002). Official Methods of Analysis. *17th Edition, Arlington, VA, USA.*
- Aubertot, J.N., Barbier, J.M., Carpentier, A., Gril, J.J., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Savini, I., & Voltz, M., (2005). Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. *Expertise Scientifique Collective, Synthèse Du Rapport, INRA et Cemagref (France), 64 p.*
- Bajerlein, D. & Bloszyk J. (2004). Phoresy of *Uropoda orbicularis* (Acari : Mesostigmata) by beetles (Coleoptera) associated with cattle dung in Poland. *European Journal of Entomology, 101(1)*, 185–188. <https://doi.org/10.14411/eje.2004.022>
- Baker, J. E. (1987). Electrophoretic analysis of amylase isoenzymes in geographical strains of *Sitophilus oryzae* L., *S. zeamais* Motschulsky and *S. granarius* L. (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Stored Products. Res., 23(2)*, 125-131.
- Balachowsky, A. S. (1962). Entomologie appliquée à l'agriculture, Tome 1 : Coléoptères, premier volume. *Ed. Mason et Cie, Paris.*
- Balogun, A.M., & Fetuga, B.L. (1986). Chemical composition of some under exploited leguminous crop seeds in Nigeria. *J. Agric. Food Chem., 34*, 189–192.
- Bamaiyi, L.J., Dike, M.C., & Onu, I. (2007). Relative susceptibility of some sorghum varieties to the rice weevil *Sitophilus oryzae* L. (Coleoptera: Curculionidae). *J. Entomol., 4(5)*, 387-392.
- Barberousse, H., Olivier, R., Christelle, R., Paquot, M., Deroanne, C., & Blecker, C. (2008). “Analytical methodologies for quantification of ferulic acid and its oligomers.” *J. of the Science of Food and Agriculture, 88(9)*, 1494–1511.
- Bartnick, D.D., Mohler, C.M., & Houlihan, M. (2006). Methods for the production of food grade extracts. *United States Patent Application, 2006008862.*
- Baskin, C.C., & Baskin J.M. (1998). Seeds : Ecology, Biogeography, and Evolution of dormancy and germination. *Academic Press. San Diego. CA. USA, 666 p.*
- Bassaler, N. (2000). Le maïs et ses avenir. *Cahier Du LIPS - GERPA, (13)*, 1–47.

- Bauer, J. L., Harbaum-Piayda, B., & Schwarz, K. (2012). Phenolic compounds from hydrolyzed and extracted fiber-rich by-products. *LWT - Food Science and Technology*, 47(2), 246–254. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.01.012>
- Bauer, M. J., & Birchler, J. A. (2006). Organization of endoreduplicated chromosomes in the endosperm of *Zea mays* L. *Chromosoma*, 115, 383–394. <https://doi.org/10.1007/s00412-006-0068-2>
- Beavis, I.C. (1988). Insects and other invertebrates in classical antiquity. *Alden Press, Oxford*, 269 p.
- Bell A., & Mück O. (1997). L'analyse des systèmes post-récolte: le concept de la GTZ. *Actes d'une Réunion IITA/GTZ Tenue à Cotonou (Bénin), 13- 15 Octobre 1997*, 109-120.
- Bell, R.J., & Watters, F. L. (1982). Environmental-factors influencing the development and rate of increase of *Prostephanus-truncatus* (horn) (Coleoptera, Bostrichidae) on stored maize. *Journal of Stored Products Research*, 18(3), 131–142.
- Bell, C. H., & Wilson, S. M. (1995). Phosphine tolerance and resistance in *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae). *Journal of Stored Products Research*, 31(3), 199–205. [https://doi.org/10.1016/0022-474X\(95\)00012-V](https://doi.org/10.1016/0022-474X(95)00012-V)
- Benhalima, H., Chaudhry, M.Q., Mills, K.A., & Price, N.R. (2004). Phosphine resistance in stored-product insects collected from various grain storage facilities in Morocco. *J. of Stor. Prod. Res.*, 40(3), 241–249.
- Benz, H., Diallo, A., Lançon, F., Meuriot, V., Rasolofo, P., Temple, L., & Wane A., (2010). L'IMPARFAITE TRANSMISSION DES PRIX MONDIAUX AUX MARCHES AGRICOLES D'AFRIQUE SUBSAHARIENNE. *Farm, Cirad*, 28p.
- Berberi, N. F., Connor, A. K. O., Haycraft, C. J., & Yoder, B. K. (2009). The Primary Cilium as a Complex Signaling Review. *Current Biology*, 19(13), R526–R535. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.05.025>
- Bergvinson, D., & García-Lara, S. (2004). Genetic approaches to reducing losses of stored grain to insects and diseases. *Current Opinion in Plant Biology*, 7(4), 480–485. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2004.05.001>
- Berthelie, P., & Lipchitz, A. (2005). Quel rôle joue l' agriculture dans la croissance et le développement. *In: Tiers-Monde, tome 46(n°183)*, 603–624.

- Bily, A. (2003). Rôle et importance des déhydrodimères d'acide férulique et autres phénylpropanoïdes dans les mécanismes de résistance de *Zea mays* L. à *Fusarium graminearum* Schwabe. *Thèse de Doctorat. Université de Pau et Des Pays de l'Adour.*, 174 p.
- Bily, A. C., Reid, L. M., Taylor, J. H., Johnston, D., Malouin, C., Burt, A. J., Bakan, B., Regnault-Roger, C., Pauls, K. P., Arnason, J. T., & Philogène, B. J.R. (2003). Dehydrodimers of ferulic acid in maize grain pericarp and aleurone: Resistance factors to *Fusarium graminearum*. *Phytopathology*, 93(6), 712–719.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO.2003.93.6.712>
- Blandino, M., Mancini, M. C., Peila, A., Rolle, L., Vanara, F., & Reyneri, A. (2010). Determination of maize kernel hardness: Comparison of different laboratory tests to predict dry-milling performance. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(11), 1870–1878. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4027>
- Bloomfield, V.A. (2014). Using R for numerical analysis in science and engineering. *Chapman & Hall/CRC The R Series*, 359 p.
- Bodenheimer, F. S. (1928). *Materialien zur Geschichte der Entomologie bis Linné. Berlin, W. Junk, Vol. 1.*
- Borgemeister, C., Adda, C., Djomamou, B., Degbey, P., Agbaka, A., Djossou, F., & Markham, R.H. (1994). The effect of maize cob selection and the impact of the field infestation on stored maize losses by larger grain borer (*Prostephanus truncatus* [Horn] Col. , Bostrichidae) and associated storage pests. *Proceedings of the 6th International Working Conference on Stored Product Protection, Canberra.*, 2, 906 – 909.
- Bosque-Perez, N. A., Markham, R. H., & Fajemisin, J. M. (1991). Occurrence of larger grain borer *Prostephanus truncatus* in Burkina Fasso. *FAO Plant Protection Bulletin.*, 39, 182-183.
- Bourgou, S., Beji, R. S., Medini, F., & Ksouri, R. (2016). Effet du solvant et de la méthode d'extraction sur la teneur en composés phénoliques et les potentialités antioxydantes d'*Euphorbia helioscopia*. *Journal of New Sciences, Agriculture and Biotechnology*, 28(12), 1649–1655.
- Boxal, R. A. (1986). A critical review of the methodology for assessing farm-level grain losses after harvest. *Tropical Development and Research Institute, U.K.*, 139.

- Boz, H. (2015). p-Coumaric acid in cereals: presence, antioxidant and antimicrobial effects. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(11), 2323–2328. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12898>
- Bressani, R., Benavides, V., Acevedo, E., & Ortiz, M. A. (1990). Changes in selected nutrient contents and in protein quality of common and quality-protein maize during rural tortilla preparation. *Cereal Chem.*, 67(6), 515–518.
- Bressani, R., & Mertz, E.T. (1958). Studies on corn proteins. 4. Protein and amino acid content of different corn varieties. *Cereal Chemistry*, 35, 227–235.
- Buckland, P.C. (1981). The early dispersal of insect pests of stored products as indicated by archaeological records. *Journal of Stored Products Research*, 7(1), 1–12.
- Burge, R.M., Duensing, W.J. (1989). Processing and dietary fiber ingredient applications of corn bran. *Cereal Foods World*, 34(7), 535–538.
- Byerlee, D., & Eicher, C.K. (1997). Africa's emerging maize revolution. *Lynne Rienner Publishers, London, UK*, 306P.
- C.I.E. (Commission Internationale de l'Éclairage) (1976). Official recommendations on uniform colour spaces, colour differences equations and metric colour terms. *Supplement N°2 to C.I.E. Publication N°15, Paris, France*.
- CABI (Centre for Agricultural Bioscience International). (2019). Invasive Species Compendium. *Wallingford, UK: CAB International. Wwww.Cabi.Org/Isc. (Extrait Le 02/08/2019)*.
- Carbas, B., Vaz-Pattd, M. C., Brdnze, M. R., Bents-Da-Silva, A., Trigd, M. J., & Brites, C. (2016). Maize flour parameters that are related to the consumer perceived quality of 'broa' specialty bread. *Food Science and Technology (Campinas)*, 36(2), 259–267. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6674>
- Cardona, C., & Sotelo, G. (2005). Mecanismos de resistencia a insectos : naturaleza e importancia en la formulación de estrategias de mejoramiento para incorporar resistencia a salivazo en Brachiaria. *Pasturas Tropicales*, 27(2), 2-11.
- Carrillo, W., Carpio, C., Morales, D., Vilcacundo, E., Álvarez, M., & Silva, M. (2017). Content of fatty acids in corn (*Zea mays* L.) oil from Ecuador. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 10(8), 150–153. <https://doi.org/10.22159/ajpcr.2017.v10i8.18786>
- CEEMAT. (1988). Conservation des grains en régions chaudes. *Ed. Ministère de La Coopération et Du Développement (Techniques Rurales En Afrique)*, 545 p.

- Charcosset, A., & Gallais, A. (2009). Emergence et développement du concept de variétés hybrides chez le maïs. *"Le Sélectionneur Français". UMR Génétique Végétale. INRA-Université de Paris-Sud-CNRS Agro Paris Tech Ferm Du Moulin 91190GIF/YVETTE, 60, 21-30.*
- Cheigh, C.I., Chung, E.Y., & Chung, M.S. (2012). Enhanced extraction of flavanones hesperidin and narirutin from *Citrus unshiu* Peel using subcritical water. *J. of Food Engineering., 110, 472-477.*
- Chih, B., Liu, P., Chinn, Y., Chalouni, C., Komuves, L. G., Hass, P. E., Sandoval, W., & Peterson, A. S. (2011). A ciliopathy complex at the transition zone protects the cilia as a privileged membrane domain. *Nature Publishing Group, 14(1), 61-72.* <https://doi.org/10.1038/ncb2410>
- Chiremba, C., Rooney, L. W., & Trust, B. (2012). "Microwave-assisted extraction of bound phenolic acids in bran and flour fractions from Sorghum and Maize Cultivars Varying in Hardness." *J. of Agricultural and Food Chemistry., 60(18), 4735-4742.*
- Classen, D., Arnason, J.T., Serratos, J.A., Lambert, J.D.H., Nozzolillo, C., Philogène, B.J.R. (1990). Correlation of phenolic acid content of maize to resistance to *Sitophilus zeamais*, the maize weevil, in CIMMYT'S collections. *Journal of Chemical Ecology, 16(2), 301-315.* <https://doi.org/10.1007/BF01021766>
- Collin, S., Crouzet, J. (2011). Polyphénols et procédés: transformation des polyphénols au travers des procédés appliqués à l'agro-alimentaire. *Lavoisier, 336 p.*
- Combs, C.W. & Porter, J.E. (1986). Some factors affecting the infestation of wheat and maize by *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Stored Products Research, 22(1), 33-41.*
- Coulibaly, K., Vall, E., Autfray, P., & Sedogo, P. M. (2012). Performance technico-économique des associations maïs / niébé et maïs / mucuna en situation réelle de culture au Burkina Faso : potentiels et contraintes. *Tropicultura, 30(3), 147-154.*
- Cowley, R. J., Howard, D. C., & Smith, R. H. (1980). The effect of grain stability on damage caused by *Prostephanus truncatus* (Horn) and three other beetle pests of stored maize. *Journal of Stored Products Research, 16(2), 75-78.* [https://doi.org/10.1016/0022-474X\(80\)90041-7](https://doi.org/10.1016/0022-474X(80)90041-7)
- Cruz, J., Troude, F., Griffon, D., & Hebert, J. P. (1988). Conservation des grains en régions chaudes. *Ministère de La Coopération et Du Développement-Paris. (Techniques Rurales En Afrique), 545 p.*

- CSA. (2010). Rapport de campagnes 2006, 2007 et 2010. *Ministère de l'Agriculture –DAPS*, 24 p.
- Culhaoglu, T., Zheng, D., Méchin, V., & Baumberger, S. (2011). "Adaptation of the Carrez procedure for the purification of ferulic and p-coumaric acids Released from lignocellulosic biomass prior to LC/MS Analysis." *J. of Chromatography*, 879(28), 3017–3022.
- Dabire, C. L. B., Niango Ba, M., & Sanon, A. (2008). Effects of crushed fresh *Cleome viscosa* L. (Capparaceae) plants on the cowpea storage pest, *Callosobruchus maculatus* Fab. (Coleoptera: Bruchidae). *International Journal of Pest Management*, 54(4), 319–326. <https://doi.org/10.1080/09670870802266953>
- Danho, M., Haubruge, E., Gaspar, C., & Lognay, G. (2000). Sélection des grains-hôtes par *Prostephanus truncatus* (Coleoptera, Bostrychidae) en présence de grains préalablement infestés par *Sitophilus zeamais* (Coleoptera, Curculionidae). *Belg. J. Zool.*, 130(1), 3–9.
- Danho, M., & Haubruge, É. (2003). Comportement de ponte et stratégie reproductive de *Sitophilus zeamais* [Coleoptera: Curculionidae]. *Phytoprotection*, 84(2), 59–67. <https://doi.org/10.7202/007808ar>
- De Groote, H., De Groote, B., Bruce, A. Y., Marangu, C., & Tefera, T. (2017). Maize storage insects (*Sitophilus zeamais* and *Prostephanus truncatus*) prefer to feed on smaller maize grains and grains with color, especially green. *Journal of Stored Products Research*, 71, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2017.01.005>
- De la Parra, C., Serna Saldivar, S.O., & Liu, R. H. (2007). Effect of processing on the phytochemical profiles and antioxidant activity of corn for production of masa, tortillas, and tortilla chips. *J Agric Food Chem.*, 55, 4177–4183.
- Deffan, K. P., Akanvou, L., Akanvou, R., Nemlin, G. J., & Kouamé, L. (2015). Évaluation morphologique et nutritionnelle de variétés locales et améliorées de maïs (*Zea mays* l.) produites en Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE*, 11(3), 181–196.
- Delobel, A., & Malonga, P. (1987). Insecticidal properties of six plant materials against *Caryedon serratus* (DL.) Coleoptera: Bruchidae. *J. Stored Prod. Res.*, 23(3), 173--176.
- Delobel, A., & Tran, M. (1993). Les Coléoptères des denrées alimentaires entreposées dans les régions chaudes. *Faune Tropicale*, 32, 424. Retrieved from <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:39066>

- Demianyk, C. J., & Sinha, R. N. (1987). Effect of infestation by the larger grain borer *Prostephanus truncatus* (Hom) and the lesser grain borer *Rhyzoperta dominica* F. (Coleoptera: Bostrichidae) on stored corn. *Environ Entomol*, 16, 618-624.
- Demissie, G., Swaminathan, R., Ameta, O. P., Jain, H. K., & Saharan, V. (2015). Biochemical basis of resistance in different varieties of maize for their relative susceptibility to *Sitotroga cerealella* (Olivier) (Lepidoptera: Gelechiidae). *Journal of Stored Product and Postharvest Research*, 6(4), 1-12. <https://doi.org/10.5897/JSPPR2013.0167>
- Dethier, V.G. (1947). Chemical Insect Attractants and Repellents. Philadelphia: The Blakiston Company, 289P. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.92098-1>
- Diagne, A. (2019). Nanoparticules de silice et revêtement nanocomposite à base d'argent pour la prévention de l'infestation des récoltes d'arachide par *Caryedon serratus* et les *Aspergillus* producteurs d'aflatoxines dans les endroits de stockage. Thèse de Doctorat Unique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 167 p.
- Dick, K., (1988). A review of insect infestation of maize in farm storage in Africa with special reference to the ecology and control of *Prostephanus truncatus* (NRI Bulletin 18). *Greenwich Academic Literature Archive (GALA)*, 3-50.
- Dick, K., Rees, D. P., Lay, K. K., & Oforu, A. (1989). Occurrence of larger grain borer *Prostephanus truncatus* (Horn) in Ghana. *FAO Plant Protection Bulletin*, 37, 43.
- Dièye, C. T. (2011). Commerce, agriculture et marchés alimentaires en Afrique de l'Ouest : comment faire face aux crises?. *Passerelles*, 12(4), 24 p.
- Dobie, P. & Kilminster, A. M. (1978). The susceptibility of triticate to post-harvest infestation by *Sitophilus zeamais* Mots., *Sitophilus oryzae* L. and *S. granaries*. *J. Stored Prod. Res.*, 14, 87-93.
- Dobie, P. (1973). Laboratory assessment of the inherent susceptibilities of 25 varieties of Malawi maize to post-harvest infestation by *Sitophilus zeamais* Motsch. *Tropical Products Institute Report L33*, iii+16pp.
- Dobie, P. (1974). The laboratory Assessment of the Inherent Susceptibility of Maize varieties to Post-Harvest Infestation by *Sitophilus zeamais* Motshh. (Coleoptera, Curculionidae). *Journal of Stored Products Research*, 10(3-4), 183-197. [https://doi.org/10.1016/0022-474X\(74\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0022-474X(74)90006-X)
- Dobie, P. (1977). The contribution of the tropical stored products center to the study of insect resistance in stored maize. *Trop. Stored Prod. Info.*, 34, 7-22.
- Doebley, J. (1990). Molecular evidence and the evolution of maize. *Economic Botany*,

44(1), 6–27.

- Doebley, J., Stec, A., & Gustus, C. (1995). Teosinte branched1 and the origin of maize: evidence for epistasis and the evolution of dominance. *Genetics Society of America*, 141(81), 333–346.
- Dombrink-Kurtzman, M.A., & Bietz, J.A. (1993). Zein composition in hard and soft endosperm of maize. *Cereal Chem.*, 70, 105-108.
- Dugon, M. M., & Arthur, W. (2012). Comparative studies on the structure and development of the venom-delivery system of centipedes , and a hypothesis on the origin of this evolutionary novelty. *Evolution and Development*, 14(1), 128–137. <https://doi.org/10.1111/j.1525-142X.2011.00527.x>
- Dunstan, W. R., & Magazini I. A. (1981). Outbreaks and new records: Tanzania. The Larger grain Borer on stored products FAO. *Plant Protection Bulletin*, 29, 80-81.
- Earle, F. R., Curtis, J. J. & Hubbard, J. E. (1946). Composition of the component parts of the corn kernel. *Cereal Chem.*, 23, 504–511.
- Eaves, J., & Eaves, S. (2007). Renewable corn-ethanol and energy security. *Energy Policy*, 35(11), 5958–5963. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.06.026>
- Eden, W. G. (1952). Effects of kernel characteristics and components of husk cover on rice weevil damage to corn. *Journal of Economic Entomology*, 45(6), 1084–1085.
- Emuh, F. (2007). Economic yield and sustainability of maize crop (*Zea mays* L.) in Association with cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and egusi-melon (*Citrullus lunatus* Thumb mansf) in South Western Nigeria. *Journal of Agronomy*, 6(1), 157–161.
- Eyherabide, G. H., Robutti, J. L., & Borras, F. S. (1996). Effect of near-infrared transmission-based selection on maize hardness and the composition of zeins. *Cereal Chem.*, 73(6), 775-778.
- FAO, FIDA & PAM. (2013). L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde. Les multiples dimensions de la sécurité alimentaire. *Rome. FAO*.
- FAO, FIDA & PAM. (2015). L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde 2015. Objectifs internationaux 2015 de réduction de la faim: des progrès inégaux. *Rome. FAO*.
- FAO (2012a). Catalogue officiel des variétés de Maïs. *Dakar (Sénégal)*, 68–76. Retrieved from http://www.fao.org/pgrfa-gpa-archive/sen/docs/senegal_Variétés/Variétés_sen/cereales1.4.pdf
- FAO (2012b). Pertes et gaspillages alimentaires dans le monde – ampleur, causes et prévention. *Rome*.

- FAO. (1987). Amélioration et production de maïs, du sorgho et du mil. *Sélection, Agronomie et Production de Semences, Rome, 2*, 559 p.
- FAO. (2013). La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. *Rome*, 114 p.
- FAO. (2017). Perspectives de récolte et situation alimentaire. *Bulletin d'informations, 4*, 40.
- FAO. (2018). Conference regionale de la fao pour l'afrique. *Soudan*, 14 p.
- FAO et OMS. (2005). Revue critique des méthodes d'analyse. *Rapport FAO*, 226 p.
- Fixon-Owoo, S., Levasseur, F., Williams, K., Sabado, T. N., Lowe, M., Klose, M., Mercier, A. J., Fields, P., & Atkinson, J. (2003). Preparation and biological assessment of hydroxycinnamic acid amides of polyamines. *Phytochemistry, 63*(3), 315–334. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(03\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(03)00133-X)
- Fleurat-Lessard, F. (1996). Ecophysiologie des arthropodes nuisibles aux stocks des céréales en Afrique tropicale. *Post-recolte. 45p*
- Floyd, C. D., Rooney, L. W., & Bockholt, A. J. (1995). Measuring desirable and undesirable color in white and yellow food corn. *Cereal Chemistry, 72*(5), 488–490.
- Folch, J., Lees, M., & Stanley, G.H.S. (1957). A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *J. Biol. Biochem, 226*(1), 497-509.
- Fonseca, R. R., Smith, B. D., Wales, N., Cappellini, E., Skoglund, P., Fumagalli, M., Samaniego, J. A., Carøe, C., Ávila-arcos, M. C., Hufnagel, D. E., Vieira, F. G., Jakobsson, M., Arriaza, B., Willerslev, E., Nielsen, R., Hufford, M. B., Albrechtsen, A., Ross-ibarra, J., & Gilbert, M. T. P. (2015). The origin and evolution of maize in the Southwestern United States. *NATURE PLANTS, 1*(14003), 1–5. <https://doi.org/10.1038/nplants.2014.3>
- Fortunato, A., & Turillazzi, S. (2012). Arthropod structure & development dufour 's gland possible role in the evolution of sting morphology and function in hover wasps (Hymenoptera; Stenogastrinae). *Arthropod Structure and Development, 41*(3), 259–264. <https://doi.org/10.1016/j.asd.2012.02.007>
- Fourar-Belaifa, R., & Fleurat-Lessard, F. (2015). Susceptibility of some cereal species and cultivars grown in Algeria to post-harvest damage by the rice weevil. *Cahiers Agricultures, 24*(5), 283–291. <https://doi.org/10.1684/agr.2015.0767>
- Fox, G., & Manley, M. (2009). Hardness methods for testing maize kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 57*(13), 5647–5657. <https://doi.org/10.1021/jf900623w>

- Freeman, P. (1980). Common insect pests of stored food products. *A Guide to Their Identification. British Muscum (Natural History), Economie Series, N° 15 (6th Ed.), London, 69 p.*
- Gallardo, C., Jiménez, L., & García-Conesa, M. T. (2006). Hydroxycinnamic acid composition and in vitro antioxidant activity of selected grain fractions. *Food Chemistry, 99*(3), 455–463. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.053>
- Gallo, J. (2007). Crop losses to pests. In: Pimentel D., In *Encyclopedia of pest management*. (pp. 60–62). CRC Press.
- García-Lara, S., & Bergvinson, D.J. (2007). Integral program to reduce post-harvest losses in maize. *Agric. Técnica México.*, 33, 181-189.
- García-Lara, S., & Bergvinson, D.J. (2014). Phytochemical and nutraceutical changes during recurrent selection for storage pest resistance in tropical maize. *Crop Science, 54*(6), 2423–2432. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.03.0223>
- García-Lara, S., Burt, A.J., Serratos, J.A., Pontones, D.M.D., Arnason, J.T., Bergvinson, D.J. (2003). Defensas naturales en el grano de maíz al ataque de *Sitophilus zeamais* (Motsch, Coleoptera: Curculionidae): mecanismos y bases de la resistencia. *Rev. Educ. Bioquímica (REB, Mex.)*, 22, 138-145.
- García-Lara, S., Bergvinson, D. J., Burt, A. J., Ramputh, A. I., Díaz-Pontones, D. M., & Arnason, J. T. (2004). The role of pericarp cell wall components in maize weevil resistance. *Crop Science, 44*(5), 1546–1552.
- Gatignol, C., & Étienne, J.-C. (2010). Pesticides et santé, un cadre réglementaire européen et national. *Office Parlementaire d'évaluation Des Choix Scientifiques et Technologiques*, 1–6.
- Georgen G. (2005). Petit manuel d'identification des principaux ravageurs des denrées stockées en Afrique de l'Ouest, l'Institut international d'Agriculture Tropicale (IITA), Benin. 20 p.
- Georghiou, G. P. (1990). Overview of insecticide resistance. In *Managing Resistance to Agrochemicals; Green, M., et Al.; ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC, 421*, 18-41.
- Giannuzzo, A.N., Boggetti, H.J., Nazareno, M.A., & Mishima, H.T. (2003). Supercritical fluid extraction of naringin from the peel of Citrus paradise. *Phytochemical Analysis.*, 14, 221-223.

- Giga, D.P., & Canhao, J. (1993). Competition between *Prostephanus truncatus* (Horn) and *Sitophilus zeamais* (Motsch.) in maize at two temperatures. *Journal of Stored Products Research*, 29(1), 63–70.
- Giga, D. P., & Smith, R. H. (1985). Oviposition markers in *Callosobruchus maculatus* F. and *Callosobruchus rhodesianus* Pic. (Coleoptera, Bruchidae): Assymetry of interspecific responses. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 12(3), 229–233.
- Godon B., & Willm, C. (1998). Les industries de première transformation des céréales. *Collection - Collection Sciences et Techniques Agroalimentaires - Lavoisier / Tec et Doc*, 656 p.
- Goergen, G. (2005). Petit manuel d'identification des principaux ravageurs des denrées stockées en Afrique de l'Ouest. *INRAB - IITA / Benin*, 22 p.
- Goffman, F.D., & Böhme, T. (2001). Relationship between fatty acid profile and vitamin E content in maize hybrids (*Zea mays* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(10), 4990–4994. <https://doi.org/10.1021/jf010156y>
- Gomez, L.A., Rodriguez, J.G., Poneleit, C.G., Blake, D.F., & Smith, C.R. (1983). Influence of nutritional characteristics of selected corn genotypes on food utilization by the rice weevil (Coleoptera: Curculionidae). *J. of Economic Entomology*, 76(4), 728–732.
- Gonçalves, C., Dinis, T., & Batista, M. T. (2005). Antioxidant properties of proanthocyanidins of *Uncaria tomentosa* bark decoction : a mechanism for anti-inflammatory activity. *Phytochemistry*, 66, 89–98.
<https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2004.10.025>
- Gross, R. A., & Kalra, B. (2002). Biodegradable Polymers for the Environment. *Science*, 297(5582), 803–808.
- Grunsven, R. H. A. V., Donners, M., Boekee, K., Tichelaar, I., Geffen, K. G. V., Groenendijk, D., Berendse, F. & Veenendaal, E. M. (2014). Spectral composition of light sources and insect phototaxis , with an evaluation of existing spectral response models. *J. Insect Conserv.*, 18 (2), 225–231. <https://doi.org/10.1007/s10841-014-9633-9>
- Guedes, N. M. P., Guedes, R. N. C., Campbell, J. F., & Throne, J. E. (2010). Contest behaviour of maize weevil larvae when competing within seeds. *Animal Behaviour*, 79(2), 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2009.10.022>

- Guèye, M.T., Badiane, M., Ndiaye, A.B., Mbaye, I., Diouf, M., & Ndiaye, S. (2008). La protection des stocks de maïs au Sénégal: enquêtes sur les pratiques d'utilisation des pesticides et plantes à effet insecticide en milieu paysan. *ITA Echos*, 3, 12 p. Retrieved from http://www.ansd.sn/ressources/publications/RGPHAE_2013_Chapitre_Agriculture.pdf
- Gueye M. T., Cissokho, P. S., Goergen, G., Ndiaye, S., Seck, D., Gueye, G., Wathelet, J. P., Lognay, G. (2012). Efficacy of powdered maize cobs against the maize weevil *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) in stored maize in Senegal. *International Journal of Tropical Insect Science*, 32(2), 94–100. <https://doi.org/10.1017/S1742758412000148>
- Gueye, M. T., Goergen, G., Badiane, D., Hell, K., & Lamboni, L. (2008). First report on occurrence of the larger grain borer *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrichidae) in Senegal. *African Entomology*, 2000(2), 309–311. <https://doi.org/10.4001/1021-3589-16.2.309>
- Guèye, M. T., Seck, D., Wathelet, J. P., & Lognay, G. (2011). Lutte contre les ravageurs des stocks de céréales et de légumineuses au Sénégal et en Afrique occidentale: Synthèse bibliographique. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 15(1), 183–194.
- Gutiérrez-uribe, J. A., Rojas-garcía, C., García-lara, S., & Serna-saldivar, S. O. (2010). Phytochemical analysis of waste water (nejayote) obtained after lime-cooking of different types of maize kernels processed into masa for tortillas. *Journal of Cereal Science*, 52(3), 410–416. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.07.003>
- Gwinner, J., Harnisch, R., & Muk, O. (1996). Manual on the prevention of post-harvest grain losses. *Post-Harvest Protection Project, GTZ, Eschborn, FRG.*, 330 p.
- Hahn, D. A., & Denlinger, D. L. (2011). Energetics of insect diapause. *Annual Review of Entomology*, 56(1), 103–121. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-112408-085436>
- Halstead, D. G. H. (1963). External sex differences in stored-products Coleoptera. *Bulletin of Entomological Research*, 54(01), 119–134.
- Hansson, B. S., & Stensmyr, M. C. (2011). Review evolution of insect olfaction. *Neuron*, 72(5), 698–711. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.11.003>

- Hardacre, A.K. & Clark, S. M. (2006). The effect of hybrid and growing environment on the rheological properties of starch and flour from maize (*Zea mays* L.) grain dried at four temperatures. *International Journal of Food Science and Technology*, 41(s2), 144-150.
- Hardman, J. M. (1978). A logistic model simulating environmental changes associated with the growth of populations of rice weevils, *Sitophilus oryzae*, reared in small cells of wheat. *Journal of Applied Ecology*, 15(1), 65-87.
- Haubruge, E., & Verstraeten, C. (1987). Interaction entre *Prostephanus truncatus* (Horn) et quatre espèces de Coléoptères des denrées, ravageuses du maïs. *Med. Fac. Landbouw. Rijksuniv. Genst.*, 52, 241-245.
- Haubruge, E. (1987). Contribution à la connaissance du mode de vie du Grand Capucin du Grain *Prostephanus truncatus* (Horn), (Coleoptera: Bostrichidae) et à son contrôle. *Diplomarbeit an Der Faculté Des Sciences Agronomiques de l'Etat, B-5800 Gembloux (Belgique)*, 104 p.
- Haugh, C. G., Lien, R. M., Hanes, R. E., & Ashman, R. B. (1976). Physical properties of pop corn. *Transactions of the ASAE*, 19(1), 0168–0171.
- Hawley, A.W. (1985). The effect of larval density on adult longevity of a mosquito , *Aedes sierrensis* : Epidemiological Consequences. *J. Anim. Ecol.*, 54(3), 955–964.
- Heerwaarden, J.V., Doebley, J., Briggs, W.H., Glaubitz, J.C., Goodman, M.M., & Jesus, J.D. (2011). Genetic signals of origin , spread , and introgression in a large sample of maize landraces. *PNAS*, 108(3), 1088–1092. <https://doi.org/10.1073/pnas.1013011108>
- Heiser, C.B., Jr. (1973). Seed to civilization. The story of man's food. *San Francisco, Calif., W.H. Freeman and Company. USA.*, pp.xii + 243pp.
- Helbig, J. (1995). Écologie de *Prostephanus truncatus* au Togo examinée notamment du point de vue des interactions avec le prédateur *Teretriosoma nigriscens*. *GTZ, Eschborn, Germany*, 111 p.
- Herrera, M., Conchello, P., Juan, T., Estopanan, G., Herrera, A., & Arino, A. (2010). Fumonisins concentrations in maize as affected by physico-chemical, environmental and agronomical conditions. *Maydica*, 55, 121–126.
- Heuer, C. M., Kollmann, M., Binzer, M., & Schachtner, J. (2012). Arthropod structure & development neuropeptides in insect mushroom bodies. *Arthropod Structure and Development*, 41(3), 199–226. <https://doi.org/10.1016/j.asd.2012.02.005>

- Hidalgo P., Karen, V., Lavin-aramburo, M., Salazar-salas, N. Y., Chavez-ontiveros, J., Reyes-moreno, C., & Muy-rangel, M. D. (2011). Characterization of free amino acid QTLs in maize opaque2 recombinant inbred lines. *Journal of Cereal Science*, 53(2), 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.01.005>
- Hiruy, B., & Getu E. (2018). “Insect pests associated to stored maize and their bio rational management options in Sub-Sahara Africa.” *International Journal of Academic Research and Development*, 3(1): 741–48.
- Hodges, R., Dunstan, W. R., Magazini, I., & Golob, P. (1983). An outbreak of *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera : Bostrichidae) in East Africa (Tabora, Tanzania). *Protection Ecology*, 5(2), 183–194.
- Hodges, R.J. (1982). A review of the biology and control of the greater grain borer *Prostephanus truncatus* (Horn). *Thesis, University of Reading*.
- Holst, N., Meikle, W.G. & Markham, R.H. (2000). Grain injury models for *Prostephanus truncatus* (Coleoptera Bostrichidae) and *Sitophilus zeamais* (Coleoptera Curculionidae) in rural maize stores in West Africa. *J. Econ. Entomol.*, 1338-1346.
- Honek, A. (1993). Intraspecific variation in body size and fecundity in insects: a general relationship. *OIKOS*, 66(3), 483–492.
- Hoopen, M. E., & Maïga, A. (2012). Production et transformation du maïs. *Collection Pro-Agro*, 32 p.
- Hu, G., Burton, C., & Yang, C. (2010). Efficient measurement of amylose content in cereal grains. *Journal of Cereal Science*, 51(1), 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.08.007>
- Isenring, R. (2010). Les pesticides et la perte de biodiversité. *Bruxelles-Belgique: Pesticide Action Network Europe*, 31 p.
- Ishii, T. (1997). Structure and functions of feruloylated polysaccharides. *Plant Science*, 127(2), 111–127. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(97\)00130-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(97)00130-1)
- ISO 10520. (1998). Amidons et féculés natifs - Dosage de l'amidon - Méthode polarimétrique de Ewers. *AFNOR Editions*, V03-628.
- ITIS. (Integrated Taxonomic Information System) (2019). *Prostephanus truncatus* (Horn, 1878), Taxonomic Serial No.: 81737. *Taxonomic Information System On-Line Database* » [Http://Www.Itis.Gov](http://www.itis.gov). [Extrait Le 02/08/2019].

- Ivbiłjaro, M.F. (1981). The resistance of new varieties of maize to post-harvest infestation by *Sitophilus zeamais* Motsch and *Sitophilus oryzae* (L.). *Journal of Agricultural Science*, 96(2), 479–481.
- Jarosz, N. (2004). Étude de la dispersion atmosphérique du pollen de maïs : contribution à la maîtrise des risques de pollinisation croisée. DOCTORAT de l' Institut National Agronomique Paris-Grignon, 119 p.
- Jay, E., & D'Orazio, R. (1983). Progress in use of controlled atmospheres in actual field situation in the United States. In *Proc.Int. Symp:-Practical Aspects of Controlled Atmosphere and Fumigation in Grain Storages, 11–12 April in Perth, Western Australia*, 3-13.
- Johansen, N.S., Vänninen, I., Pinto D.M., Nissinen, A. I., & Shipp, L. (2011). In the light of new greenhouse technologies : 2 . Direct effects of artificial lighting on arthropods and integrated pest. *Annals of Applied Biology*, 159, 1–27.
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2011.00483.x>
- Kane, A. M., Lyon, B. G., Swanson, R. B., & Savage, E. M. (2003). Comparison of two sensory and two instrumental methods to evaluate cookie color. *Journal of Food Science*, 68(5), 1831–1837. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb12338.x>
- Karababa, E. (2006). Physical properties of popcorn kernels. *J. of Food Engineering*, 72(1), 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.11.028>
- Kaupp, U. B. (2010). Olfactory signalling in vertebrates and insects : differences and commonalities. *Nature Reviews Neuroscience*, 11(3), 188–200.
<https://doi.org/10.1038/nrn2789>
- Kean, E.G., Hamaker, B.R., & Ferruzzi, M. G. (2008). Carotenoid bioaccessibility from whole grain and degermed maize meal products. *J. Agric. Food Chem.*, 56(21), 9918–9926.
- Kega, V.K., & Warui, C.W. (1983). *Prostephanus truncatus* in Coast Province Kenya. *Tropical Stored Products Information*, 46, 2 p.
- Kéita, S.M., Vincent, c., Schmit, J.P., Arnason, J.T., & Bélanger, A. (2001). Efficacy of essential oil of *Ocimum basilicum* L. and *O. gratissimum* L. applied as an insectidal fumigant and powder 10 control **Callosobruchus maculatus** Fab. (Coleoptera: Bruchidae). *J Stored Prod. Res.*, 37(4), 339–349.
- Kellogg, E. A. (1997). Plant evolution : The dominance of maize the copyright holder has not granted permission for this figure to be reproduced electronically . *Current Biology*, 7(7), 411–413.

- Kevin, J.M. (2002). Maize kernel components and their roles in maize weevil resistance. *International Center for the Improvement of Wheat and Maize (CIMMYT), Mexico City. Available at: <https://www.worldfoodprize.org/documents/filelibrary/> (Accessed 2019.08.28.), 17.*
- Khan, A. H., Minhas, N. M., Asasd, M. J., Iqbal, A., Ilyas, M., & Mahmood, R. T. (2014). Estimation of carbohydrate, starch, protein and oil contents of maize (*Zea mays*). *European Journal of Academic Research, II(4)*, 5230–5240.
- Khan, Z. (1997). A review of entomological techniques and methods used to determine mechanisms and bases of stem borer resistance in maize. . . In: *Mihm, J.A. (Ed.), Insect Resistance Maize: Recent Advances and Utilization; Proceeding of an International Symposium Held at CIMMYT. CIMMYT, Mexico D.F., Mexico.*
- Kim, S., Biswas, A., Singh, M., Peterson, S.C., Liu, S. (2012). Thermal dissolution of maize starches in aqueous medium. *Journal of Cereal Science, 56(3)*, 720–725. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.08.004>
- Kim, S.K. (1992). Plante-hôte : résistance polygénique ou monogénique. *La Recherche à l'IITA, N°5*, 20-21.
- Kim, K.N., Huang, Q.Y. & Lei, C.L. (2019). Advances in insect phototaxis and application to pest management: a review. *Pest Management Science, 75(12)*, 3135–3143. <https://doi.org/10.1002/ps.5536>
- Klass, K.-D., Matushkina, N. A., & Kaidel, J. (2012). Arthropod structure & development the gonangulum : a reassessment of its morphology , homology , and phylogenetic signi fi cance. *Arthropod Structure and Development, 41(4)*, 373–394. <https://doi.org/10.1016/j.asd.2012.03.001>
- Klass, K., & Ulbricht, J. (2009). The female genitalic region and gonoducts of Embioptera (Insecta), with general discussions on female genitalia in insects. *Organisms, Diversity & Evolution, 9(2)*, 115–154. <https://doi.org/10.1016/j.ode.2009.01.002>
- Klass, K.D. (2008). The female abdomen of ovipositor-bearing odonata (Insecta : Pterygota). *Arthropod Systematics and Phylogeny, 66(1)*, 45–142.
- Kolivogui, K., & Mück, O. (1991). Larger grain borer (*Prostephanus truncatus*) in Guinea. *FAO Plant Protection Bulletin, 39*, 43 p.
- Kossou, D. K., Bosque-Pérez, N. A., & Mareck, J. H. (1992). Effects of shelling maize cobs on the oviposition and development *Sitophilus zeamais* motschulsky. *J. Srored Prod. Res, 28(3)*, 187–192.

- Kossou, D.K. & Bosque-Perez, N. A. (1998). Insect pests of maize in storage: biology and control. *IITA Research Guides, No. 32. Ibadan, Nigeria: IITA*, 28 p.
- Kossou, D. K., Bosque-Pérez, N. A., & Mareck, J.H. (1993). Effets de l'égrenage du maïs sur l'oviposition et le développement du charançon du maïs. *J. of Stored Products Research.*, 28(3), 187-192.
- Kossou, D. K. (1987). Un nouveau prédateur dans le système post – récolte de la République populaire du Bénin : *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrichidae). *Carrefour de La Rech.*, 2, 11.
- Kossou, D. K., Mareck, J.H., & Bosque-Pérez, N.A. (1993). Comparison of improved and local maize varieties in the Republic of Benin with emphasis on susceptibility to *Sitophilus zeamais* (Motschulsky). *J. Stored Prod. Res.*, 29(4), 333–343.
- Krall, S. (1984). A new threat to farm level maize storage in west Africa. *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrichidae) *Trop. Stored Product Inf.*, 50, 26 – 31.
- Kriz, A.L. (1989). Characterization of embryo globulins encoded by the maize Glb genes. *Biochem Genet.*, 27.(3–4), 239-251.
- Laberie, V. (1992). Problèmes fondamentaux posés par les insectes des denrées. In : Foua-Bi K. & Philogène B.J.R., (pp. 9-14.). Côte d'Ivoire: éd. Actes du séminaire international à Abidjan.
- Lale, N. E. S., & Yusuf, B. A. (2001). Potential of varietal resistance and Piper guineense seed oil to control infestation of stored millet seeds and processed products by *Tribolium castaneum* (Herbst). *Journal of Stored Products Research*, 37(1), 63–75. [https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(00\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0022-474X(00)00007-2)
- Lamboni, Y., & Hell, K. (2009). Propagation of mycotoxigenic fungi in maize stores by post-harvest insects. *International Journal of Tropical Insect Science*, 29(1), 31–39. <https://doi.org/10.1017/S1742758409391511>
- Landry, J., & Moureaux, T. (1970). Heterogeneity of corn seed glutelin: selective extraction and amino acid composition of the 3 isolated fractions. *Bull Soc Chim Biol.*, 52, 1021-37.
- Lantos, I., Spangenberg, J. E., Giovannetti, M. A., Ratto, N., & Maier, M. S. (2015). Maize consumption in pre-Hispanic south-central Andes: Chemical and microscopic evidence from organic residues in archaeological pottery from western Tinogasta (Catamarca, Argentina). *Journal of Archaeological Science*, 55(2015), 83–99. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.12.022>

- Laurentie, M., Salifou, S., Sanders, P., & Mensah, G. A. (2012). Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB). *Bulletin de La Recherche Agronomique Du Bénin (BRAB)*, (229), 884.
- Lawton, J. W. (2002). Zein : a history of processing and use. *Cereal Chem.*, 79(1), 1–18.
- Lecointre, G., & Le Guyader, H. (2006). La classification phylogenetique du vivant. 3ème Édition (Revue et Augmentée). Editions Belin, Paris.
- Lee, K. M., Bean, S. R., Alavi, S., Herrman, T. J., & Waniska, R. D. (2006). Physical and biochemical properties of maize hardness and extrudates of selected hybrids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(12), 4260–4269.
<https://doi.org/10.1021/jf053101v>
- Lehane, M. (2005). The biology of blood-sucking in insects. *Cambridge University Press.*, 2, 312 p.
- Li, J., Berke, T.G., & Glover, D. V. (1994). Variation for thermal properties of starch in tropical maize germ plasm. *Cereal Chemistry*, 71(1), 87–90.
- Li, B. B., Smith B., & Hossain M. M. (2006). Extraction of phenolics from citrus peels. I. Solvent extraction method. *Separation and Purification Technology.*, 48, 182-188.
- Li, B. B., Smith, B., & Hossain M. M. (2006). Extraction of phenolics from citrus peels : II. Enzyme-assisted extraction method. *Separation and Purification Technology.*, 48(2), 189-196.
- Li, L. (1988). Behavioral ecology and life history evolution in the Larger Grain Borer, *Prostephanus truncatus* (Horn). *Ph.D. Thesis, University of Reading*.
- Li, P. X. P., Hardacre, A. K., Campanella, O. H., & Kirkpatrick, K. J. (1996). Determination of endosperm characteristics of 38 corn hybrids using the stenvert hardness test. *Cereal Chemistry*, 73(4), 466–471.
- Liu, R. H. (2007). Whole grain phytochemicals and health. *Journal of Cereal Science* 46, 46, 207–219. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.06.010>
- Longstaff, B. C. (1981). Biology of the grain pest species of the genus *Sitophilus* (Coleoptera: curculionidae): A critical review. *Protect Ecol.*, 2, 83-130.
- López-Castillo, L. M., Silva-Fernández, S. E., Winkler, R., Bergvinson, D. J., Arnason, J. T., & García-Lara, S. (2018). Postharvest insect resistance in maize. *Journal of Stored Products Research*, 77, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2018.03.004>

- Lullien-Pellerin, V. (2014). Phytomicronutriments des grains de céréales : un aperçu de la génétique au consommateur en passant par la transformation. *Agronomiques, Innovations*, 42, 139–152.
- Makanjuola, W.A. (1989). Evaluation of extracts of neem (*Azadirachta indica* A. Juss) for the control of some stored product pests. *J. of Stored Prod. Res.*, 25(4), 231-237.
- Makundi, R. H., Swila, N. N., Misangu, R. N., Reuben, S. W.M., Mwatawala, M., Sikira, A., Kilonzo, B. S., Lyimo, H., Massawe, A. W., & Ishengoma, C. (2010). Dynamics of infestation and losses of stored maize due to the larger grain borer (*Prostephanus truncatus* Horn) and maize weevils (*Sitophilus zeamais* Motschulsky). *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 43(14), 1346–1355.
- Malvar, R.A., Revilla, P., Moreno-González, J., Butrón, A., Sotelo, J., & Ordás, A. (2008). White maize: genetics of quality and agronomic performance. *Crop Science*, 48(4), 1373–1381.
- Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Rémésy, C., & Jime, L. (2004). Polyphenols: food sources and bioavailability. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 79(5), 727–47.
- Mangel, M., Rohnheim, J. A., & Adler, F. R. (1994). Clutch size , offspring performance , and intergenerational fitness. *Behavioral Ecology*, 5(4), 412–417.
- Mangelsdorf, P.C. & Reeves, R. G. (1939). The origin of Indian corn and its relatives. *Texas Agric. Exp. Sta. Bull.*, 574, 1–315.
- Manthey, J.A., & Grohmann, K. (1996). Concentrations of hesperidin and other orange peel flavonoids in citrus processing by products. *J. of Agricultural and Food Chemistry*, 44, 811–814.
- Markham, R.H., Bosque-Perez N.A., Borgemeister C., & Meikle W.U. (1994). Developing pest management strategies for *Sitophilus zeamais* (Motschulsky) and *Prostephanus truncatus* (Horn) in the tropics. *FAO Plant Protection Bulletin* 42 (3) 97-116
- März, U. (1989). The economics of neem production and its use in pest control. *Farming Systems and Resource Economics in the Tropics Vol. 5, Wissenschaftsverlag Vauk, Kiel*, 154p.
- Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M. M., Jesus Sanchez, G., Buckler, E., Doebley, J. (2002). A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *PNAS*, 99(9), 6080–6084.
- McLaren, K. (1976). XIII—The development of the CIE 1976 (L* a* b*) uniform colour space and colour-difference formula. *Coloration Technology*, 92(9), 338–341.

- Meikle, W. G., Adda, C., Azoma, K., Borgemeister, C., Degbey, P., Djomamou, B., & Markham, R. H. (1998). The effects of maize variety on the density of *Prostephanus truncatus* (Coleoptera: Bostrichidae) and *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) in post-harvest store in Benin Republic. *Journal of Stored Products Research*, 34(1), 45–58. [https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(97\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0022-474X(97)00020-9)
- Mendiola-Olaya, E., Valencia-Jiménez, A., Valdés-Rodríguez, S., Délano-Frier, J., & Blanco-Labra, A. (2000). Digestive amylase from the larger grain borer, *Prostephanus truncatus* Horn. *Comparative Biochemistry and Physiology - B Biochemistry and Molecular Biology*, 126(3), 425–433. [https://doi.org/10.1016/S0305-0491\(00\)00216-9](https://doi.org/10.1016/S0305-0491(00)00216-9)
- Mihm, J. A. (1985). Breeding for host plant resistance to maize stem-borers. *International Journal of Tropical Insect Science*, 6(3), 369–377.
- Mihm, J.A. (ed.). (1997). Insect resistant maize recent advances and utilization. *Proceedings of an International Symposium Held at the International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT) 27 November-3 December, 1994. Mexico, D.F.: CIMMYT.*
- Milán-Carrillo, J., Gutiérrez-Dorado, R., Cuevas-Rodríguez, E.O., Garzón-Tiznado, J.A., & Reyes-Moreno, C. (2004). Nixtamalized flour from quality protein maize (*Zea mays* L). optimization of alkaline processing. *Plant Foods Hum Nutr.*, 59(1), 35-44.
- Mills, R.B. (1989). *Sitophilus zeamais* Motchulsky breeding in acorns. *Journal Kansas Entomology Soc.*, 62(3), 416–418.
- Mohamed, A. A., Ashman, R. B., & Kirleis, A. W. (1993). Pericarp thickness and other kernel physical characteristics relate to microwave popping quality of pop corn. *J. of Food Science*, 58(2), 342–346.
- Morand-Fehr, P., & Tran, G. (2001). La fraction lipidique des aliments et les corps gras utilisés en alimentation animale. *INRA Prod. Anim.*, 14(5), 285–302.
- Mori, H., Kawabata, K., Yoshimi, N., Tanaka, T., Murakami, T., Okada, T., & Murai, H. (1998). Chemopreventive effects of ferulic acid on oral and rice germ on Large Bowel Carcinogenesis. *Anticancer Research*, 19(5A), 3775–3778.
- Morrison, W. R., & Laignelet, B. (1983). An improved colorimetric procedure for determining apparent amylose and other starches. *J. of Cereal Science*, 1(1), 9-20.

- Muatinte, B.L., Kavallieratos, N.G., Boukouvala, M.C., García-Lara, S., López- Castillo, L.M., & Vumi, B.M. (2019). The threat of the larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Coleoptera: Bostrichidae) and practical control options for the pest. *CAB. Rev.*, 14 (41), 1-25.
- Müller, J. (2017). Analyse de référence selon la méthode de Dumas ou la méthode de Kjeldahl ? *Livre Blanc de FOSS*, 5.
- Multigner, L. (2005). Effets retardés des pesticides sur la santé humaine. *Environnement, Risques et Sante*, 4(3), 187–194.
- Murdock, L. L., & Shade, R. E. (1991). Eradication of cowpea weevil (Coleoptera: Bruchidae) in cowpeas by Solar Heating. *American Entomologist*, 37(4), 228–231.
- Myers, P., Espinosa, R., Parr, C. S., Jones, T., Hammond, G. S., & Dewey, T. A. (2019). The animal diversity Web (online). Accessed at [Https://Animaldiversity.Org](https://Animaldiversity.Org). (Extrait Le 02/08/2019).
- Nang'ayo, F.L.O. (1996). Ecological studies on larger grain borer in savannah woodlands of Kenya. *Ph.D.Thesis, Imperial College, London, U.K.*
- Nansen, C., & Meikle, W. G. (2002). The biology of the larger grain borer , *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera : Bostrichidae). *Integrated Pest Management Reviews*, 7(2), 91–104.
- Nardon, P. (1963). Les possibilités d'emploi des radiations dans la lutte contre les insectes. *Phytoma*, 144, 7-12.
- Ndiaye, A., Fofana, A., Ndiaye, M., Mbaye, D. F., Sène, M., Mbaye, I., & Chantereau, J. (2005). Les céréales. In *Bilan de La Recherche Agricole et Agroalimentaire Au Sénégal*, 241–256, 522 p.
- Ngamo, L. S. T., & Hance, T. (2007). Diversité des ravageurs des denrées et méthodes alternatives de lutte en milieu tropical. *Tropicultura*, 25(9), 215–220.
- Ngom, D., & Sembène, M. (2020). Varietal-hosts attractance and repellence to larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera; Bostrichidae) and role played by grains morphophysical and biochemical characteristics. *International Journal of Tropical Insect Science*, DOI 10.1007/s42690-020-00145-4
- Omonteche, C.A. (1986). Caractéristiques phénologiques et physiques et sensibilité de quelques variétés de maïs au *Sitophilus zeamais* Motsch. *Mémoire d'Ingénieur Agronome, Université Nationale Du Bénin.*

- OMS, & PNUE. (1991). L'utilisation des pesticides en agriculture et ses conséquences pour la santé publique. *World Health Organization*, 151 p.
- Osipitan, A. A., Olaifa, O. K., & Lawal, O. A. (2012). Evaluation of proximate composition of maize grains infested by maize weevil (*Sitophilus Zeamais* L.) (Coleoptera: Curculionidae). *Mun. Ent. Zool*, 7(1), 439–445.
- Paliwal R.L., & FAO. (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2002). Le maïs en zones tropicales: amélioration et production. *Food & Agric. Org. Ed.* 382p.
- Pandey, R., Singh, A., Maurya, S., Singh, U. P., & Singh, M. (2013). Phenolic acids in different preparations of maize (*Zea mays*) and their role in human health. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci.*, 2(6), 84–92.
- Panneton, B., Vincent, C., & Fleurat-Lessard, F. (2000). Bilan et perspectives pour la lutte physique en phytoprotection. Pp. 333-339 in C. Vincent, B. Panneton et F. Fleurat-Lessard (Eds.) *La Lutte Physique En Phytoprotection*, INRA Editions, Paris, 347 p.
- Pantenius, C. U. (1988). Storage losses in traditional maize granaries in Togo. *International Journal of Tropical Insect Science*, 9(06), 725–735. <https://doi.org/10.1017/s1742758400005610>
- Papachristos, D.P., & Stamopoulos, D.C. (2002). Toxicity of vapours of three oils to immature stages of *Acanthoscelides obtectus* (Say) (Coleoptera: Bruchidae). *Journal of Stored Products Research.*, 38(4), 365-373.
- Park, D., Allen, K. G. D., Stermitz, F. R., & Maga, J. A. (2000). Chemical composition and physical characteristics of unpopped pop corn hybrids. *J. of Food Composition and Analysis*, 13, 921–934. <https://doi.org/10.1006/jfca.2000.0943>
- Parmentier, M., & Foua – Bi, K. (1989). Céréales en régions chaudes : Conservation et transformation. *Editions John Libbey Eurotext, Montrouge, France*, 167 – 177.
- Pascual N., Marco M.-P., & Belles X. (1990). Azadirachtin induced imaginal moult deficiencies in *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Stored Products Research*, 26(1), 53–57.
- Paterson, J.L., Hardacre, A., Li, P., & Rao, M. A. (2001). Rheology and granule size distributions of corn starch dispersions from two genotypes and grown in four regions. *Food Hydrocolloids.*, 15(4–6), 453-459.
- Paul, A., & Southgate, D. A. T. (1978). New Food Tables. *Nutrition and Food Science*, 78(1), 2–3.

- Peters, L.L., Fairchild, M.L., Zuber, M.S. (1972). Effect of corn endosperm containing different levels of amylose on angoumois grain moth l Biology . 3 . Interrelationship of amylose levels and moisture content of diets 2. *Journal of Economic Entomology*, 65(4), 1168–1169.
- Pflugfelder, R. L., Rooney, L. W., & Waniska, R. D. (1988). Dry matter losses in commercial corn masa production. *Cereal Chemistry*, 65, 127–132.
- Phillips, T.W., & Throne, J.E. (2010). Biorational approaches to managing stored-product insects. *Annu. Rev. Entomol.*, 55, 375-397.
- Philogène, B.J.R., & Arnason, J.T. (1995). La résistance du maïs aux insectes phytophages : une question de molécules. *Université d'Ottawa. Cahiers Agricultures*, 4, 85-90.
- Philogène, B.J.R., Arnason, J.T., & Lambert, J.D.H. (1989). Facteurs contribuant à la protection du maïs contre les attaques de *Sitophilus* et *Prostephanus*. *Céréales En Régions Chaudes. Aupelf-Uref. Eds. John Libbey Eurotext, Paris*, 141-150.
- Pike, V., Akinnibagbe, J. J. A., & Bosque-Perez, N. A. (1992). Nigeria-Larger grain borer (*Prostephanus truncatus*) outbreak in Western Nigeria. *FAO Plant Protection Bulletin*, 40(4), 170-173.
- Pineli, L. de L. de O., Moretti, C. L., Chiarello, M., & Melo, L. (2015). Influence of strawberry jam color and phenolic compounds on acceptance during storage. *Revista Ceres*, 62(3), 233–240. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562030002>
- Pingali, P. L., & Pandey, S. (2001). Meeting world maize needs: technological opportunities and priorities for the public sector. In: P.L. Pingali, Editor, *CIMMYT 1999–2000. World Maize Facts and Trends. Meeting World Maize Needs: Technological Opportunities and Priorities for the Public Sector. CIMMYT, Mexico D.F., Mexico.*, 67p.
- Planetoscope-Statistique. (2018). Production mondiale de maïs. *Www.Planetoscope.Com/Cereales/193-Production-Mondiale-de-Mais.Html*. Consulté Le 19/10/2018 à 12h01mn.
- Plarre, R., Wohlgemuth, R., & Harnisch, R. (1993). Effectiveness of insecticides as fabric protectants to control stored product pests. *GTZ Hamburg*, 138 p.
- Pomeranz, Y., Hall, G.E., Czuchjowska, Z., & Lai, F. (1986). Test weight, hardness, and breakage susceptibility of yellow dent corn hybrids. *Cereal Chem*, 63, 349–351.
- Prates, H.T., Santos, J.P., Waqui, J.M., Fabris, J.D., Oliveira, A. B., & Forster, J.E., (1998). Insecticidal activity of monoterpenes against *Rhyzopertha dominica* (F.) and *Tribolium castaneum* (Herbst). *Journal of Stored Products Research*, 34(4), 243–249.

- Prout, T., & McChesney, F. (1985). Competition among immatures affects their adult fertility: population dynamics. *American Naturalist*, 126(4), 521–558.
- Qamar, S., Aslam, M., & Javed, M. A. (2016). Determination of proximate chemical composition and detection of inorganic nutrients in maize (*Zea mays* L.). *Materials Today: Proceedings*, 3(2), 715–718. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.01.118>
- Rahman, S., Bird, A., Regina, A., Li, Z., Philippe, J., Mcmaugh, S., Topping, D., & Morell, M. (2007). Resistant starch in cereals : Exploiting genetic engineering and genetic variation. *Journal of Cereal Science*, 46(3), 251–260.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.05.001>
- Rao, N. K., Hanson, J., Dulloo, M. E., Ghosh, K., Nowell, D., & Larinde, M. (2007). Manual of seed handling in genebanks. *Bioversity International*, N°8, 147 p.
- Regnault-Roger, C. (2002). De nouveaux phytoinsecticides pour le troisième millénaire ? *In Biopesticides d'Origine Végétale Philogène BJR, Regnault-Roger C, Vincent C (Eds). Lavoisier Éditions Tec & Doc: Paris ;, 19-39.*
- Richards, O.W. (1947). Observations of grain weevils, Calandra (Coleoptera: Curculionidae). I. General biology and oviposition. *Proc Zool Soc Lond.*, 117, 1–43.
<https://doi.org/10.1038/163393a0>
- Robutti, J.L., Borrás, F.S., Eyherabide, G.H. (1997). Zein composition of mechanically separated coarse and fine portions of maize kernels. *Cereal Chem.*, 74, 75-78.
- Rosentrater, K. A. (2006). A review of corn masa processing residues : Generation, properties, and potential utilization. *Waste Management*, 26(3), 284–292.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.03.010>
- Roy, N., & Barik, A. (2014). Long-chain free fatty acids from Sunflower (Asteraceae) Leaves: allelochemicals for host location by the arctiid moth, *Diacrisia casignetum* Kollar (Lepidoptera: Arctiidae). *J. of the Kansas Entomological Society*, 87(1), 22-36.
- Russell, M.P. (1962). Effects of sorghum varieties on the lesser rice weevil , *Sitophilus oryzae* (L .) I . Oviposition , immature mortality , and size of adults. *Annals of the Entomological Society of America*, 55(6), 678–685.
- Sabelli, P. A. (2012). Replicate and die for your own good : Endoreduplication and cell death in the cereal endosperm. *Journal of Cereal Science*, 56(1), 9–20.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.09.006>
- Saunders, D.S. (2013). Insect photoperiodism : Measuring the night. *Journal of insect physiology*, 59, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2012.11.003>

- Sandhu, K. S., Singh, N., & Malhi, N. S. (2007). Food chemistry some properties of corn grains and their flours I : Physicochemical , functional and chapati-making properties of flours. *Food Chemistry*, 101(3), 938–946.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.02.040>
- Sandhu, K. S., Singh, N., & Kaur, M. (2004). Characteristics of the different corn types and their grain fractions: Physicochemical, thermal, morphological, and rheological properties of starches. *Journal of Food Engineering*, 64(1), 119–127.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.09.023>
- Sandhu, K.S., Singh, N., & Malhi, N.S. (2005). Food chemistry physicochemical and thermal properties of starches separated from corn produced from crosses of two germ pools. *Food Chemistry*, 89(4), 541–548. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.03.007>
- Sanon, A., Garba, M., Auger, J., & Huignard, J. (2002). Analysis of the insecticidal activity of methylisothiocyanate on the Coleoptera Bruchidae *Callosobruchus maculatus* and its parasitoid *Dinarmus basalis* (Pteromalidae). *Journal of Stored Products Research*, 38, 285-295.
- Santiago, R., & Malvar, R. A. (2010). Role of dehydrodiferulates in maize resistance to pests and diseases. *International Journal of Molecular Sciences*, 11(2), 691–703.
<https://doi.org/10.3390/ijms11020691>
- Sayyed, A.H., Ahmad, M., & Crickmore, N. (2008). Fitness costs limit the development of resistance to indoxacarb and deltamethrin in *Heliothis virescens* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Economic Entomology*, 101(6), 1927–1933.
<https://doi.org/10.1603/0022-0493-101.6.1927>
- Schmutterer, H., & Ascher, K.R.S. (1984). Natural pesticides from the neem tree and other tropical plants. *Proceedings of the 2nd International Neem Conference. Rauschholzhausen*, 25, 587 p.
- Schneider, D. (1964). Insects antennae. *Annu. Rev. Entomol*, 9(1), 103–122.
- Schoch, T. J. (1945). Advances in carbohydrate chemistry. Ed. W.W. Pigman, M.L. Wolfrom, *Acad. Press. Inc.*, 1, 1–374.
- Schoonhoven, A.V., Horber, E., & Mills, R.B. (1976). Conditions modifying expression of resistance of maize kernels to the maize weevil. *Environmental Entomology*, 5(1), 163–168.

- Schuster, C.L., & Smeda, R.J. (2007). Management of *amaranthus rudis* S. in glyphosate-resistant corn (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L. Merr.). *Crop Protection*, 26(9), 1436–1443. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.12.005>
- Seck, D., Sidibé, B., Haubruge, E., Lienard, V., & Garpar, Ch. (1992). La Résistance variétale du niébé (*Vigna unguiculata* (L) Walp.) à *Callosobruchus maculatus* F. (Col. Bruchidae): Evaluation et perspectives d'utilisation au Sénégal. *Med. Fac. Landbouww. Rij Ksuniv. Gent.*, 57(3a), 743 – 750.
- Seck, D. (1993). Resistance to *C. maculatus* F. (Col. Bruchidae) in some cowpea varieties from Senegal. *Stored Prod. Res.*, 29(1), 9-52.
- Seck, D., Lognay, G., Haubruge, E., Marlier, M., & Gaspar, C. (1996). Alternative protection of cowpea seeds against *Callosobruchus maculatus* (F .) (Coleoptera : Bruchidae) using hermetic storage alone or in combination with *Boscia senegalensis* (Pers .) Lam ex Poir. *J Stored Prod. Res*, 32(1), 39–44.
- Seetharaman, K., Tziotis, A., Borrás, F., White, P. J., Ferrer, M., & Robutti, J. (2001). Thermal and functional characterization of starch from Argentinean corn. *Cereal Chemistry*, 78(4), 379–386. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2001.78.4.379>
- Semassa, A.J., Anihouvi, V.B., Padonou, S.W., Adjanohoun, A., Aly, D., Gbenou, J., & Baba-Moussa, L. (2017). Nutritional properties assessment of endogenous and improved varieties of maize (*Zea mays* L.) Grown in Southern Benin. *Pak. J. Biol. Sci.*, 20(6), 267–277. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2017.267.277>
- Semassa, A.J., Padonou, S.W., Anihouvi, V.B., Akissoé, N.H., Aly, D., Adjanohoun, A., & Baba-Moussa, L. (2016). Diversité variétale , qualité et utilisation du maïs (*Zea Mays*). En Afrique De l'Ouest : Revue Critique. *European Scientific Journal*, 12(18), 1857–7431. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n18p197>
- Sembène, M., Gueye, M. T., Délobel, P., Sall, A., & Délobel, A. (2006). Desinsectisation des stocks d'arachide infestés par *Caryedon serratus* (Ol .) : Utilisation de la solarisation en zone sahélienne. *Journal Des Sciences*, 6(1–11).
- Sen, A., Bergvinson, D., Miller, S. S., Atkinson, J., Fulcher, R. G., & Amason, J. T. (1994). Distribution and microchemical detection of phenolic acids, flavonoids, and phenolic acid amides in maize kernels. *J. Agric. Food Chem.*, 42, 1879–1883.
- Serratos, A., Arnason, J. T., Nozzolillo, C., Lambert, J. D.H., Philogène, B. J.R., Fulcher, G., Davidson, K., Peacock, L., Atkinson, J., & Morand, P. (1987). Factors contributing to resistance of exotic maize populations to maize weevil, *Sitophilus zeamais*. *Journal of*

Chemical Ecology, 13(4), 751–762. <https://doi.org/10.1007/BF01020157>

Sharifi, S., & Mills, R. B. (1971). Radiographic studies of *Sitophilus zeamais* Mots. in wheat kernels. *Journal of Stored Products Research*, 7(3), 195–198.

Sharifi, S., & Mills, R. B. (1971). Developmental activities and behavior of the rice weevil inside wheat kernels. *Journal of Economic Entomology*, 64(5), 1114–1118. <https://doi.org/10.1093/jee/64.5.1114>

Shewry, P.R., & Casey, R. (1999). Seed proteins. In *Seed Proteins*, P.R. Shewry and R. Casey, Eds (Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers), 1–10.

Shiferaw, B., Prasanna, B. M., Hellin, J., & Bänziger, M. (2011). Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food Security*, 3(3), 307–327. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0140-5>

Shimoda, M., & Honda, K. (2013). Insect reactions to light and its applications to pest management. *Appl. Entomol. Zool.*, 48, 413–421. <https://doi.org/10.1007/s13355-013-0219-x>

Shires, S.W., & McCarthy, S. (1976). A character for sexing live adults of *Prostephanus truncatus* (Horn) (Bostrichidae, Coleoptera). *Journal of Stored Products Research*, 12(4), 273–275.

Shires, S. W. (1979). Influence of temperature and humidity on survival, development period and adult sex ratio in *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera, Bostrichidae). *Journal of Stored Products Research*, 15(1), 5–10. [https://doi.org/10.1016/0022-474X\(79\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0022-474X(79)90018-3)

Shires, S. W. (1980). Life history of *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrichidae) at optimum conditions of temperature and humidity. *J. Stored Prod Res*, 16(3–4), 147–150.

Simmons, S.R., & Jones, R. J. (1985). Contributions of pre-silking assimilate to grain yield in maize. *Crop Science*, 25(6), 1004–1006.

Simonne A. H., Simonne E. H., Eitenmiller, R. R., Mills, H. A., & Cresman III, C. P. (1997). Could the Dumas Method Replace the Kjeldahl Digestion for Nitrogen and Crude Protein Determinations in Foods? *J. of the Science of Food and Agriculture*, 73(1), 39–45. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199701\)73:1<39::AID-JSFA717>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199701)73:1<39::AID-JSFA717>3.0.CO;2-4)

Sinclair, B. J., & Marshall, K. E. (2018). The many roles of fats in overwintering insects.

- Journal of Experimental Biology*, 121, jeb161836.
<https://doi.org/10.1242/jeb.161836>
- Singh, B. B., & Singh S. R. (1992). Sélection de niébé résistant aux bruches. *La Recherche à l'IITA*, 5, 1-5.
- Singh, D.N., McCain, F.S. (1963). Relationship of some nutritional properties of the corn kernel to weevil infestation. *Crop Science*, 3(3), 259-261.
- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N. S., & Gill, B. S. (2003). Morphological , thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, 81(2), 219–231.
- Singleton, V.L., & Rossi, J. A. Jr. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144–158. <https://doi.org/10.12691/ijebb-2-1-5>
- Smith, C. (1997). An overview of the mechanisms and bases of insect resistance in maize. In: Mihm, J.A. (Ed.), *Insect Resistance Maize: Recent Advances and Utilization; Proceeding of an International Symposium Held at CIMMYT. CIMMYT, Mexico D.F.*
- Smith, J.S.C., Goodman, M.M., & Struber, C.W. (1985). Relationships between maize and teosinte of Mexico and Guatemala: numerical data analysis of allozyme data. *Economic Botany*, 39, 12–24.
- Stalikas, C. D. (2007). "Extraction, separation, and detection methods for phenolic acids and flavonoids." *J. of Separation Science.*, 30(18), 3268–3295.
- Statista. (2018). Volume de production de maïs par pays dans le monde 2014-2018. <https://fr.statista.com/statistiques/564226/production-de-mais-par-pays-dans-le-monde/>. Consulté Le 19/10/2018 à 12h01mn.
- Steffan, J. R. (1978). Description et biologie des insectes. Scotti, G. Ed. AFNOR, ITCF, Paris, 3–62.
- Stein, W. (1986). Vorratsschädlinge, verlag eugen ulmer., Stuttgart, 287 p.
- Stejskal, V., & Kučerová, Z. (1996). The effect of grain size on the biology of *Sitophilus granarius* L. (Col., Curculionidae). 1. Oviposition, distribution of eggs and adult emergence. *J. Appl. Ent.*, 120(1–5), 143–146.
- Suleiman, R., Rosentrater, K. A., & Bern, C. J. (2015). Evaluation of maize weevils *Sitophilus zeamais* Motschulsky infestation on seven varieties of maize. *Journal of Stored Products Research*, 64, 97–102. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2015.09.005>

- Tanaka, A., & Tanaka, Y. (1972). Dry matter production, yield components and grain yield of the maize plant. *J. Fac. Agric. Hokkaido Univ.*, 57, 71–132.
- Tapondjou, L. A., Adler, C., Bouda, H., & Fontem, D. A. (2003). Bioefficacité des poudres et des huiles essentielles des feuilles de *Chenopodium ambrosioides* et *Eucalyptus saligna* à l'égard de la bruche du niébé, *Callosobruchus maculatus* Fab. (Coleoptera, Bruchidae). *Cahiers Agricultures*, 12(6), 401-407.
- Tapondjou, L. A., Adler, C., Bouda, H., & Fontem, D.A. (2002). Efficacy of powder and essential oil from *Chenopodium ambrosioides* leaves as post-harvest grain protectants against six-stored product beetles. *Journal of Stored Products Research*, 38(4), 395–402. [https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(01\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S0022-474X(01)00044-3)
- Tefera, T., Mugo, S., & Beyene, Y. (2016). Developing and deploying insect resistant maize varieties to reduce pre-and post-harvest food losses in Africa. *Food Security*, 8(1), 211–220. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0537-7>
- Tilay, A., Mahesh, B., JyotiKishen, k., & Uday, A. (2008). "Preparation of ferulic acid from agricultural wastes: Its improved extraction and purification." *J. of Agricultural and Food Chemistry.*, 56(17), 7644–7648.
- Tilman, W. (1980). Resources: a graphical mechanistic approach to competition and predation. *American Naturalist*, 116(3), 362-393.
- Torreblanca, R. A., Adem, C. E., & Bourges, R. H. (1983). Losses caused by *Prostephanus truncatus* (Horn) in maize stored under controlled condition. p. 87–89. In: "Memorias Del Coloquio Internacional Sobre Conservacion de Semillas y Granos Almancenados" (Moreno-Martinez, Retimerez-Martinez, Eds.). 20–25 Octubre 1980, Oaxtepec, More Los, Institute de Biologia, Universidad Macional Autonona de Mexico, 51 pp.
- Ullah, I., Ali, M., & Farooqi, A. (2010). Chemical and nutritional properties of some maize (*Zea mays* L.) varieties grown in NWFP, Pakistan. *Pakistan Journal of Nutrition*, 9(11), 1113–1117. <https://doi.org/10.3923/pjn.2010.1113.1117>
- Vanderschaaf P., Wilbur D.A., & Painter R.H. (1969). Resistance of corn to laboratory infestation of the larger rice weevil, *Sitophilus zeamais* M. *Journal of Economic Entomology*, 62(2), 352–355.
- Verstraeten, C., & Haubruge, E. (1987). Les processus de migration de *Prostephanus truncatus* Horn (Coleoptera : Bostrichidae) dans un stock de maïs égrené. *Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent.*, 52(2a), 235-239.

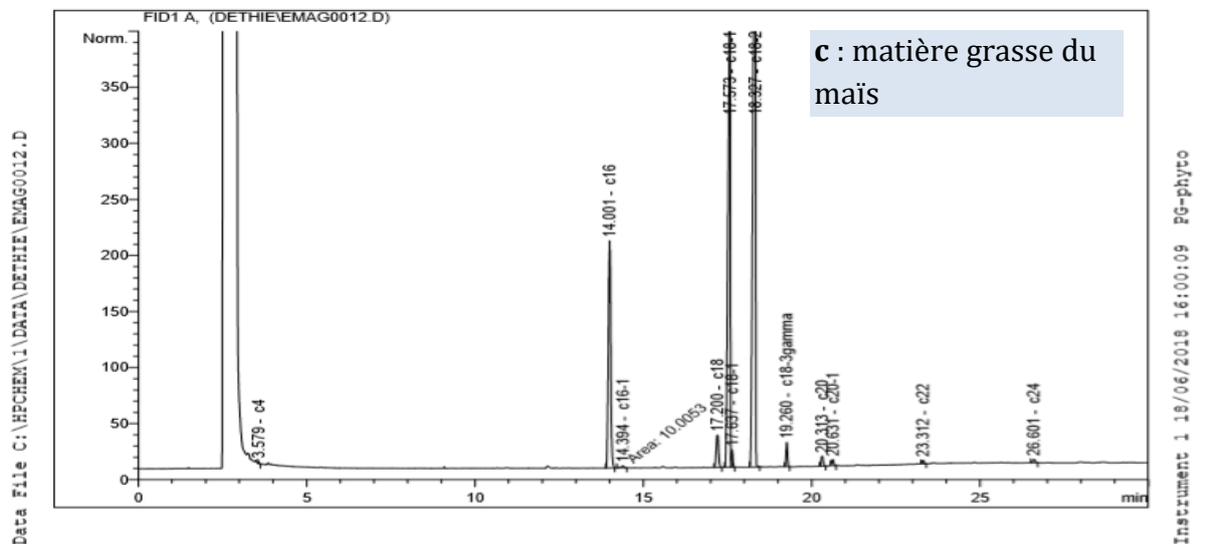
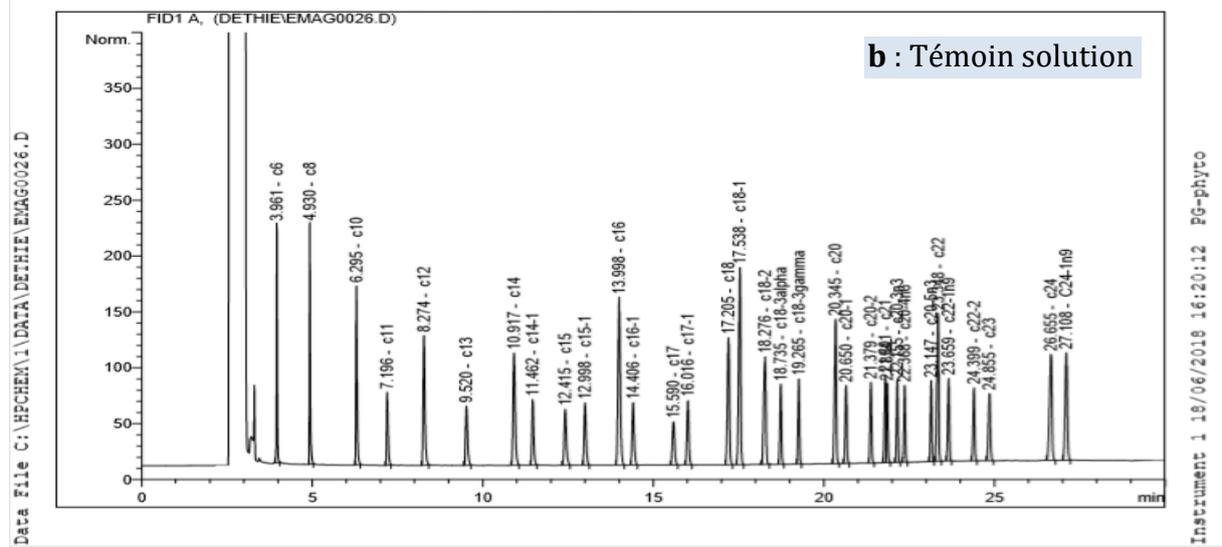
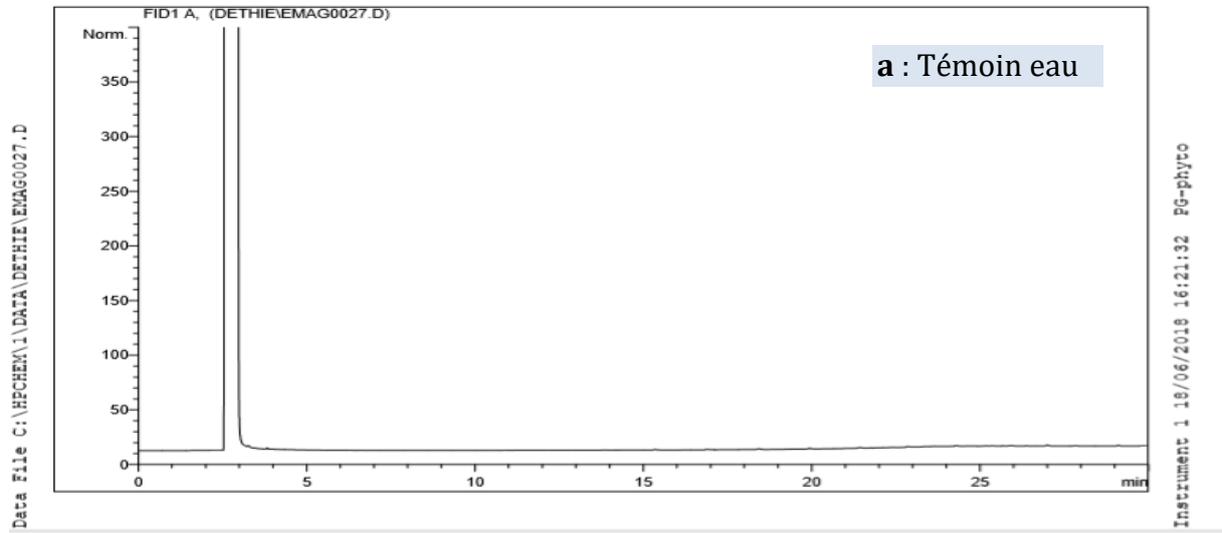
- Vincent, C., Weintraub, P. G., Hallman, G. J., & Fleurat-Lessard, F. (2009). Insect management with physical methods in pre- and post-harvest situations. *Integrated Pest Management: Concepts, Tactics, Strategies and Case Studies*, 309–323.
- Walker, G. M. (2011). 125th Anniversary review : fuel alcohol : current production and future challenges. *J. Inst. Brew.*, 117(1), 3–22.
- Wang, R., Yang, H-J., Yang, X., & Cao, B-H. (2013). “Four phenolic acids determined by an improved HPLC method with a programmed ultraviolet wavelength detection and their relationships with lignin content in 13 agricultural residue feeds.” *J. of the Science of Food and Agriculture.*, 93(1), 53–60.
- Wasielewski, O., Skonieczna, M., & Kodrık, D. (2009). Role of allatostatin-like factors from the brain of *Tenebrio molitor* females. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 71(4), 223–235. <https://doi.org/10.1002/arch.20317>
- Watson, S. A. (1987). Structure and composition. Pages 53-78 in: corn chemistry and technology. Watson S. A., and Ramstad P. E., Eds. *Am. Assoc. Cereal Chem.: St. Paul, MN.*
- Weber, E. J. (1987). Lipids in the kernel. In: *Corn: Chemistry and Technology*, Watson, S.A. and P.E. Ramstad (Eds.). *American Association of Cereal Chemists Inc., USA.*, 311–350.
- Wegmann, E. (1983). Holzaschen als wirksames mittel zur bekämpfung von *Callosobruchus maculatus* (F.). In *Traditionellen Bohnenlagern Westafrikas. Gesunde Pflanze*, 35(9), 229-234.
- Welcker, C., & Rami, J. F. (2008). Améliorer la tolérance du maïs à la sécheresse ou la productivité du sorgho : enjeux et limites. *Innovations Agronomiques*, 2, 125–130.
- Wilkes, H. G. (1967). Teosinte: the closest relative of maize. *The Bussey Institution of Harvard University*, 159 pp.
- Wilkes, H. G. (1977). Hybridization of maize and teosinte, in Mexico and Guatemala and the improvement of maize. *Economic Botany*, 31, 254-293.
- Williams, P. J., Geladi, P., Britz, T. J., & Manley, M. (2012). Investigation of fungal development in maize kernels using NIR hyperspectral imaging and multivariate data analysis. *Journal of Cereal Science*, 55(3), 272–278.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.12.003>
- Wilson, C. M. (1983). Seed protein fractions of maize, sorghum, and related cereals. Pages 271-307. In : *Seed Proteins : Biochemistry, Genetics, Nutritive Value*. W. Gottschalk and H.P. Muller, Eds. M. Nijhoff/Junk, The Hague., 2, 271–307.

- Wiseman, B. R. (1985). Types and mechanisms of host plant resistance to insect attack. *International Journal of Tropical Insect Science*, 6(3), 239–242.
- Wolf, M. J., Buzan, C. L., MacMasters M. M., & Rist, C. E. (1952). Structure of the mature corn kernel I. Gross anatomy and structural relationships. *Cereal Chemistry*, 29(5), 321-333.
- Wolf, M. J., Khoo, U., & Seckinger, H. L., (1969). Distribution and subcellular structure of endosperm protein in varieties of ordinary and high- lysine maize. *Céréales Chem*, 46, 253-262.
- Womeni, H. M., Linder, M., Tiencheu, B., Mbiapo, F. T., Villeneuve, P., Fanni, J., & Parmentier, M. (2009). Oils of insects and larvae consumed in Africa: Potential sources of polyunsaturated fatty acids. *OCL - Oleagineux Corps Gras Lipides*, 16(4), 230–235. <https://doi.org/10.1051/ocl.2009.0279>
- Wyk, J. V., Nutt, L., Zemlin, A. E., & Erasmus, R. T., (2009). Completing the audit cycle: a study on the impact of changes to a core laboratory's reception on turnaround time of routine samples. *Pathology*, 41, 82–83. <https://doi.org/10.1097/01268031-200941001-00209>
- Xu, G. H, Chen, J. C., Zhang, Y. H., Iang, P. J., & Ye, X. Q. (2008). Minerals, phenolic compounds, and antioxidant capacity of Citrus peel extract by hot water. *Food Chemistry*, 73(1), 11-17.
- Yadu, Y. K., Saxena, R. C., & Dubey, V.K. (2000). Relative susceptibility of different varieties of maize to infestation by the *Sitotroga cerealella* (Olivier) as influenced by the biochemical content of the grains. *Indian Journal of Agricultural Research*, 34(4), 243–246.
- Yapi, M., & Kouassi, D. (2017). Fiche technicoéconomique du Maïs. *Agence Nationale d'Appui Au Développement Rural, Direction d'Appui Aux Filières Agricoles. Fiche Technique*, 5 p.
- Yeo, H., Youn, K., Kim, M., Yun, E. Y., Hwang, J. S., Jeong, W. S., & Jun, M. (2013). Fatty acid composition and volatile constituents of *Protaetia brevitarsis* larvae. *Preventive Nutrition and Food Science*, 18(2), 150–156. <https://doi.org/10.3746/pnf.2013.18.2.150>
- Youn, K., Kim, J. Y., Yeo, H., Yun, E. Y., Hwang, J. S., & Jun, M. (2012). Fatty acid and volatile oil compositions of *Allomyrina dichotoma* Larvae. *Preventive Nutrition and Food Science*, 17(4), 310–314.

- Zehrer, W., Wegmann, E., & Akou-Edo, D. (1981). Effet des produits naturels sur le développement de *Callosobruchus maculatus* dans les haricots. In: *Problèmes de Post Récolte, Documentation Sur Un Séminaire OAU/GTZ, Lomé, Togo, GTZ-Publikation, Eschborn*, 133-144.
- Zhang, R., Huang, L., Deng, Y., Chi, J., & Zhang, Y. (2017). Phenolic content and antioxidant activity of eight representative sweet corn varieties grown in South China. *International Journal of Food Properties*, 20(12), 3043–3055.
<https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1270964>
- Zhao, X., Coptis, V., Farris, S. M., & Virginia, W. (2008). Metamorphosis and adult development of the mushroom bodies of the red flour Beetle , *Tribolium castaneum*. *Developmental Neurobiology*, 68(13), 1487-502.
<https://doi.org/10.1002/dneu.20669>
- Zia-ur-Rehman. (2006). Citrus peel extract-A natural source of antioxidant. *Food Chemistry*, 99, 450-454.
- Zilic, S., Milasinovic, M., Terzic, D., & Barac, M. (2011). Grain characteristics and composition of maize specialty hybrids. *Span J Agric Res*, 9(1), 230–241.
- Zobel, H. F. (1984). Starch gelatinization and mechanical properties of starch pastes. *Starch: Chemistry and Technology*. R. L. Whistler, J. N. Bemiller, et E. F. Paschall, Eds. *Academic Press: Orlando.*, 2, 589 p.
- Zuber, M. S., & Darrah L. L. (1987). Breeding, genetics, and seed corn production. Pages 31-43 in: *Corn Chemistry and Technology*. S. A. Watson and P. E. Ramstad, eds. *Am. Assoc. Cereal Chem.: St. Paul, MN*.

ANNEXES

Annexe 1: Chromatogrammes des acides gras



Data File C:\HPCHEM\1\DATA\DETHIE\EMAG0012.D

Normalized Percent Report

Sorted By : Signal
 Calib. Data Modified : 15/06/2018 15:39:53
 Multiplier : 1.0000
 Dilution : 1.0000
 Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: FID1 A,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
3.579	PP	2.37559	0.00000	0.000000	c4	
3.950		-	-	-	c6	
4.900		-	-	-	c8	
6.200		-	-	-	c10	
7.080		-	-	-	c11	
8.100		-	-	-	c12	
9.350		-	-	-	c13	
10.700		-	-	-	c14	
11.270		-	-	-	c14-1	
12.200		-	-	-	c15	
12.900		-	-	-	c15-1	
14.001	BB	1015.91693	1.00000	15.374591	c16	
14.394	MM	10.00527	1.00000	0.151417	c16-1	
15.600		-	-	-	c17	
16.000		-	-	-	c17-1	
17.200	BB	144.34715	1.00000	2.184508	c18	
17.573	BV	2031.76208	1.00000	30.748096	c18-1	
17.637	VB	43.62718	1.00000	0.660241	c18-1	
18.327	BB	3224.53369	1.00000	48.799155	c18-2	
18.700		-	-	-	c18-3alpha	
19.260	BP	67.14777	1.00000	1.016195	c18-3gamma	
20.313	PB	36.45455	1.00000	0.551693	c20	
20.631	BP	21.70615	1.00000	0.328495	c20-1	
21.370		-	-	-	c20-2	
21.800		-	-	-	c21	
22.100		-	-	-	c20-3n3	
22.350		-	-	-	c20-4n6	
23.140		-	-	-	c20-5n3	
23.312	PB	12.26469	1.00000	0.185610	c22	
23.400		-	-	-	c24-1n9	
23.640		-	-	-	c22-1n9	
24.400		-	-	-	c22-2	
24.800		-	-	-	c23	
26.601	PB	16.44436	0.00000	0.000000	c24	

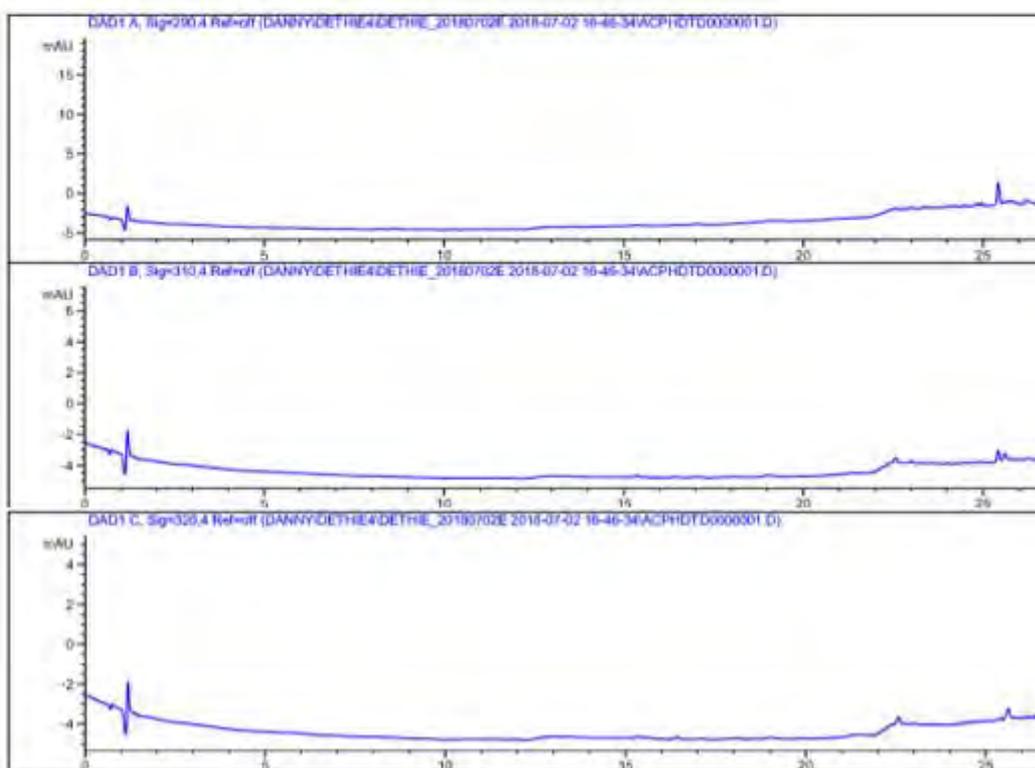
Instrument 1 18/06/2018 16:00:09 PG-phyto

Annexe 2 : absorbance aux trois longueurs d'onde ($\lambda = 290 \text{ nm}$, $\lambda = 320 \text{ nm}$ et $\lambda = 320 \text{ nm}$) des acides férulique et p-coumarique

a : Témoin eau

Data File C:\CHEM32\...DANNY\DETHIE4\DETHIE_20180702E 2018-07-02 16-46-34\ACPHETD0000001.D
Sample Name: eau

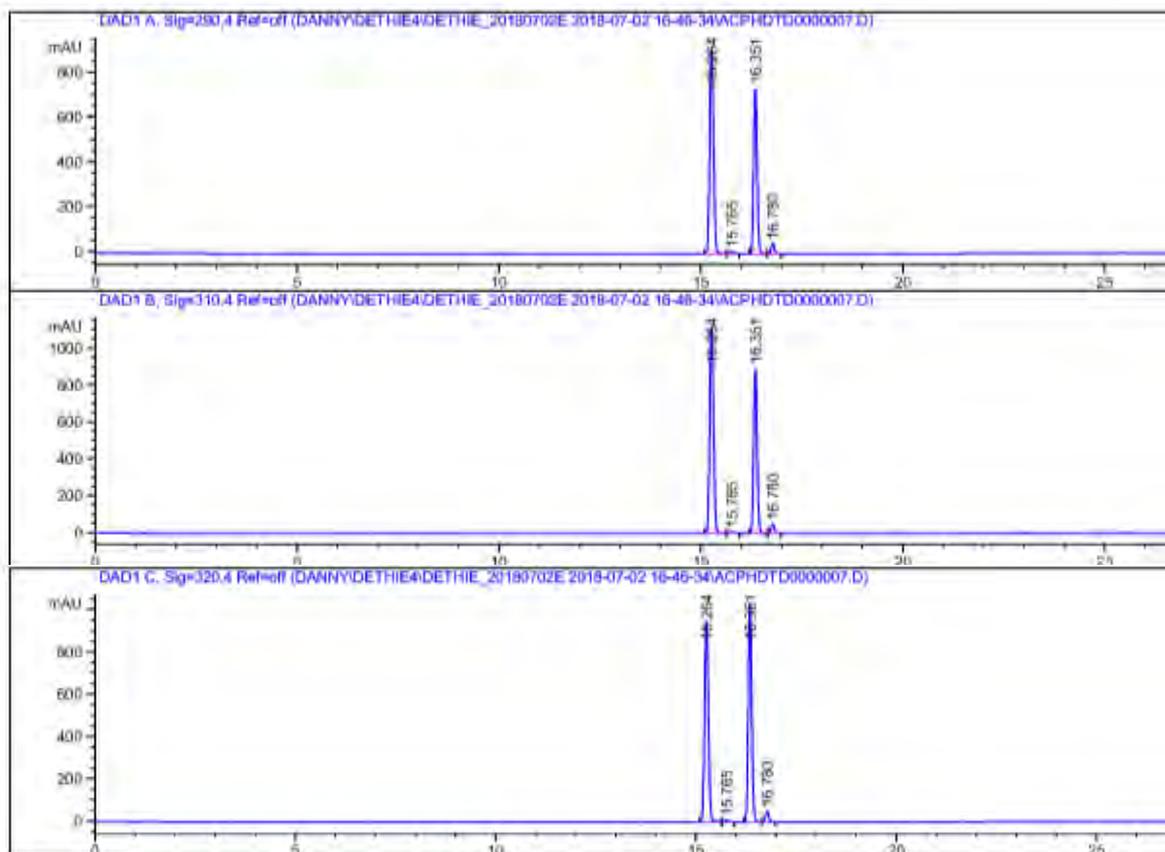
```
=====
Acq. Operator   : Dethie                      Seq. Line :    1
Acq. Instrument : Instrument 1                 Location  : Vial 1
Injection Date  : 7/2/2018 4:49:25 PM         Inj       :    1
                                                Inj Volume: 10.000 µl
                                                Actual Inj Volume: 20.000 µl
Different Inj Volume from Sequence !
Acq. Method     : C:\CHEM32\1\DATA\DANNY\DETHIE4\DETHIE_20180702E 2018-07-02 16-46-34\DETHIE1260B.M
Last changed    : 7/2/2018 10:18:46 AM by Dethie
Analysis Method : C:\CHEM32\1\METHODS\DANNY\DETHIE1260B.M
Last changed    : 7/3/2018 9:20:34 AM by Thomas
                  (modified after loading)
Method Info     : Acides phénoliques Dethié
```



Data File C:\CHEM32\1\DATA\DANNY\DETHIE4\DETHIE_20180702E 2018-07-02 16-46-34\ACPHDTD0000007.D
 Sample Name: SM

```

=====
Acq. Operator   : Dethie                               Seq. Line :    7
Acq. Instrument : Instrument 1                         Location  : Vial 7
Injection Date  : 7/2/2018 8:32:17 PM                 Inj       :    1
                                                    Inj Volume: 10.000 µl
Different Inj Volume from Sequence !   Actual Inj Volume : 2.000 µl
Acq. Method     : C:\CHEM32\1\DATA\DANNY\DETHIE4\DETHIE_20180702E 2018-07-02 16-46-34\DETHIE1260B.M
Last changed    : 7/2/2018 10:15:46 AM by Dethie
Analysis Method : C:\CHEM32\1\METHODS\DANNY\DETHIE1260B.M
Last changed    : 7/3/2018 9:20:34 AM by Thomas
                  (modified after loading)
Method Info     : Acides phénoliques Dethié
  
```



```

=====
                          Area Percent Report
=====

```

```

Sorted By      :      Signal
Multiplier:    :      1.0000
Dilution:      :      20.0000
Sample Amount: :      1.00000 [µmole/g] (not used in calc.)
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

```

```
Signal 1: DAD1 A, Sig=290,4 Ref=off
```

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [mAU*s]	Height [mAU]	Area %
1	14.606	BV	0.2592	130.86336	6.96600	4.4490
2	15.241	VV	0.1792	911.71704	68.51675	30.9960
3	15.583	VV	0.0826	455.56949	79.81754	15.4882
4	15.769	VV	0.1068	112.34498	15.10863	3.8194
5	16.340	VV	0.2939	391.57288	16.92365	13.3124
6	16.768	VV	0.1851	242.36725	17.55466	8.2398
7	16.922	VV	0.1099	98.17119	12.74387	3.3376
8	17.050	VV	0.0821	69.26192	11.86561	2.3547
9	17.179	VV	0.1163	136.11977	15.83809	4.6277
10	17.369	VV	0.1838	152.93108	11.03033	5.1992
11	17.880	VV	0.2653	240.48755	11.16418	8.1759

```
Signal 2: DAD1 B, Sig=310,4 Ref=off
```

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [mAU*s]	Height [mAU]	Area %
1	14.609	BV	0.2567	100.30157	5.39881	3.8513
2	15.241	VV	0.1757	862.67041	66.36597	33.1244
3	15.583	VV	0.0806	429.63879	77.60914	16.4971
4	15.772	VV	0.1067	86.89233	11.68699	3.3364
5	15.949	VV	0.0782	26.04578	4.73425	1.0001
6	16.342	VV	0.2037	284.88763	18.49599	10.9390
7	16.510	VV	0.0934	61.69743	9.54526	2.3690
8	16.765	VV	0.1773	220.08937	16.74783	8.4509
9	16.909	VV	0.1224	91.43639	10.62250	3.5109
10	17.180	VV	0.1598	114.45670	9.41670	4.3949
11	17.380	VV	0.2133	147.61327	8.81585	5.6680
12	17.817	VV	0.2514	178.60643	9.41260	6.8580

```
Totals :                2604.33612  248.85188
```

```
Signal 3: DAD1 C, Sig=320,4 Ref=off
```

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [mAU*s]	Height [mAU]	Area %
1	14.610	BV	0.2418	80.75692	4.36629	3.5566
2	15.241	VV	0.1738	695.71246	53.47830	30.6401
3	15.583	VV	0.0805	346.62674	62.67054	15.2659
4	15.774	VV	0.1067	70.70066	9.51447	3.1138
5	16.342	VV	0.2081	317.75635	20.13317	13.9944
6	16.510	VV	0.0961	65.24816	9.74364	2.8736
7	16.763	VV	0.1758	208.95374	16.06352	9.2026
8	16.908	VV	0.1252	87.13470	9.84609	3.8375
9	17.182	VV	0.1510	88.37173	7.75393	3.8920
10	17.380	VV	0.1703	106.09700	8.12605	4.6727
11	17.815	VV	0.2831	203.23430	9.29502	8.9507

```
Totals :                2270.59276  210.99102
```

```
1 Warnings or Errors :
```

```
Warning : Calibration warnings (see calibration table listing)
```

```

=====
*** End of Report ***

```

Annexe 3 : communications scientifiques

Ngom D, Fauconnier M-L, Thiaw C & Sembène M (2019). « Sensibilité variétale du maïs à *Sitophilus zeamais* M. et à *Prostephanus truncatus* H. et rôle des caractéristiques morphophysiques et biochimiques des grains ». *Book of Abstracts*, p. 114, 23rd Meeting and Conference of the African Association of Insect Scientists (AAIS), Abidjan, Côte d'Ivoire, 18 - 22 November 2019.

Ngom D, THIAW C & Sembène M (2019). « Sécurité alimentaire et nutritionnelle par la réduction des pertes post-récolte du maïs au Sénégal: résistance variétale aux insectes ravageurs et caractérisations morpho-physique et biochimique des grains ». *Doctoriales conjointes des Mentions « Biologie, Production et Pathologies Animales » et « Biologie, Physiologie et Pathologies Végétales » de l'ED-SEV/UCAD, Dakar, Sénégal, 03 - 04 juillet 2019.*

Ngom D, Sembène M, Fauconnier M-L, Malumba P K & Thiaw C (2019). « Sensibilité variétale du maïs à *Sitophilus zeamais* M. et à *Prostephanus truncatus* H. et rôle des caractéristiques morpho-physiques et biochimiques des grains ». *19^{ème} Colloque International et Francophone sur "Biologie de l'Insecte", Albi (Tarn), près de Toulouse, France, 26 - 28 juin 2019.*

Annexe 4: publications scientifiques

Ngom, D., Thiaw, C. and Sembène, M. (2020). Interspecific competition and grain-hosts selection of Maize Weevil, *Sitophilus zeamais* (Motsch.) (Coleoptera; Dryophtoridae) and Larger Grain Borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera; Bostrichidae). *Advances in Entomology*, 8, 34-45. <https://doi.org/10.4236/ae.2020.81003>



Scientific
Research
Publishing

Advances in Entomology, 2020, 8, 34-45
<https://www.scirp.org/journal/ae>
ISSN Online: 2331-2017
ISSN Print: 2331-1991

Interspecific Competition and Grain-Hosts Selection of Maize Weevil, *Sitophilus zeamais* (Motsch.) (Coleoptera; Dryophtoridae) and Larger Grain Borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera; Bostrichidae)

Déthié Ngom^{1*}, Cheikh Thiaw², Mbacké Sembène^{1,3}

¹Laboratory of Entomology and Acarology, Department of Animal Biology, Sciences and Technics Faculty, Cheikh Anta DIOP University, Dakar, Senegal
²University El-Hâdj Ibrahima NIASS of Sine Saloum (USSEIN), Kaolack, Senegal
³Biology Laboratory of Sahelo-Sudanese Animal Populations (BIOPASS)-Research Institute for Development (IRD), Dakar, Senegal
Email: *dethie.ngom@ucad.edu.sn

How to cite this paper: Ngom, D., Thiaw, C. and Sembène, M. (2020) Interspecific Competition and Grain-Hosts Selection of Maize Weevil, *Sitophilus zeamais* (Motsch.) (Coleoptera; Dryophtoridae) and Larger Grain Borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera; Bostrichidae). *Advances in Entomology*, 8, 34-45.
<https://doi.org/10.4236/ae.2020.81003>

Received: October 2, 2019
Accepted: November 16, 2019
Published: November 19, 2019

Copyright © 2020 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

Abstract

Laboratory interspecific competition and grain-hosts selection experiments involving maize weevil (MW), *Sitophilus zeamais* (Motsch.) and larger grain borer (LGB), *Prostephanus truncatus* (Horn) were performed under ambient temperature and relative humidity (25°C - 35°C and 70% - 80% relative humidity) in their major host cereal, maize grains. The species reproductive rate and grain-hosts preference were evaluated by a number of emerged adults. In combined infestation, both species competed intensively by simultaneously increasing their individuals' emergence, 9-fold or greater than when reared alone. Even though both species simultaneously increased their progeny, *S. zeamais* was the dominant competitor and had a significant suppressant effect on *P. truncatus*. The selection result of grain-hosts showed that *P. truncatus* placed in the environment containing both uninfested maize grains and grains previously infested by *S. zeamais*, the insect prefers uninfested grains. Indeed, *P. truncatus* individuals' emergences were significantly more important to uninfested grains than to infested grains. The weevil-infested grains seemed to have deterrent and detrimental effects on *P. truncatus*. Conversely, *S. zeamais* selection of grain-hosts was significantly ($P = 0.0001$) more attracted by *P. truncatus* infested grains than to uninfested grains. *Sitophilus zeamais* individuals' emergences were significantly ($P = 0.0008$) more important to infested grains than to uninfested grains. The *S. zeamais* preference on grains previously infested would be stimulated by *P. truncatus* larval vibrations in grain.

DOI: 10.4236/ae.2020.81003 Nov. 19, 202034Advances in Entomology

Ngom D and Sembène M (2020) "Varietal-hosts attractance and repellence to larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera; Bostrichidae) and role played by grains morphophysical and biochemical characteristics". *International Journal of Tropical Insect Science*. <https://doi.org/10.1007/s42690-020-00145-4>

International Journal of Tropical Insect Science
<https://doi.org/10.1007/s42690-020-00145-4>

ORIGINAL RESEARCH ARTICLE



Varietal-hosts attractance and repellence to larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera; Bostrichidae) and role played by grains morphophysical and biochemical characteristics

Déthié Ngom¹ · Mbacké Sembène^{1,2}

Received: 17 October 2019 / Accepted: 3 April 2020
© African Association of Insect Scientists 2020

Abstract

Maize (*Zea mays* L.), one of the three most important cereal crops worldwide, is stored in Sub-Saharan Africa to ensure the food resource availability throughout the year. However, maize stored often encounters losses in excess of 20% due to pests such as the larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera; Bostrichidae), a major pest of stored maize in tropical countries. This study aims to assess the maize varieties attractance and repellence for *P. truncatus* oviposition and to explain the role of grains morphophysical and biochemical characteristics on susceptibility. Twenty-five male/female pairs of insect were equidistantly placed in environment containing nine 30 g subsamples maize grains of the different varieties. Susceptibility parameters such as parent adults occurrence, number of emerged insects, grains damage and grains weight loss had highlighted significant differences in maize attractance and repellence to *P. truncatus* oviposition between maize varieties evaluated. Most attractant maize variety to *P. truncatus* was Synth-C, recording 6.00 ± 2.65 adults emergence per 30 g grains, with 3 times higher individuals number than that of Early-Thai followed variety. This variety (Early-Thai) recorded 2 fold or greater insects progeny than Synth-9243 and DMR-ES varieties. Inversely, most repellent varieties to *P. truncatus* were Across-Pool, Obafampa, SWAN, Tzee-White and Tzee-Yellow. For these maize varieties, the larger grain borer did not record emergence, and therefore the maize varieties exhibited not any attacks or losses. To assess the relationship between grains morphophysical and biochemical characteristics and varietal susceptibility, phenolics, palmitic acid, hardness, clarity, color and size of grains were evaluated according to standardized methods. Spearman binary correlations showed varietal attractance to *P. truncatus* oviposition was positively related to grains high palmitic acid content and large grains size. Conversely, repellent maize to *P. truncatus* oviposition can be described as a variety with high phenolics content and high grains clarity.

Keywords *Zea mays* · Postharvest · Varietal susceptibility · Insect attractants and repellents

Introduction

Maize (*Zea mays* L.) is one of the most food staple worldwide (FAOSTAT 2018), providing nutrients for humans and animals and contributes over 20% of food calories in parts of Africa and

Mesoamerica (Shiferaw et al. 2011). In Sub-Saharan Africa, maize is consumed by many people and covers lean periods for farmers (Ngamo and Hance 2007; Guèye et al. 2008; Adjile 2012). Thus, storage of maize assures food resource availability during whole year, and is one of major factors for food security. However, huge amount of maize is lost between harvest and consumption (Freeman 1980), forcing farmers to sell their maize off cheaply soon after harvest to avoid losses in storage and buy food later at higher prices. During storage, insects are major pests of maize (Pantenius 1988) and one of the most voracious insects is the larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera; Bostrichidae) (Verstraeten and Haubruge 1987; Borgemeister et al. 1994; Helbig 1995). The larger grain borer infestation starts in field and adults attack mainly whole or broken grains and flour during storage (Agbaka et al. 1999; Delobel

✉ Déthié Ngom
dethie.ngom@ucad.edu.sn

¹ Laboratory of Entomology and Acarology, Department of Animal Biology, Sciences and Techniques Faculty, Cheikh Anta DIOP University, Dakar, Senegal

² Biology Laboratory of Sahelo-Sudanese Animal Populations (BIOPASS) - Research Institute for Development (IRD), Dakar, Senegal

Published online: 22 April 2020
Published online: 22 April 2020

Springer

Ngom D, Fauconnier M-L, Malumba P, Dia CAKM, Thiaw C and Sembène M (2020) "Varietal susceptibility of maize to larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Horn)(Coleoptera; Bostrichidae), based on grain physicochemical parameters". *PLoS ONE*, 15(4):e0232164. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232164>

PLOS ONE

RESEARCH ARTICLE

Varietal susceptibility of maize to larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera; Bostrichidae), based on grain physicochemical parameters

Déthié Ngom^{1,2*}, Marie-Laure Fauconnier³, Paul Malumba⁴, Cheikh Abdou Khadre Mbacké Dia¹, Cheikh Thiaw², Mbacké Sembène^{1,5}

1 Department of Animal Biology, Laboratory of Entomology and Acarology, Sciences and Technics Faculty, Cheikh Anta DIOP University, Dakar, Senegal, **2** Senegalese Institute of Agricultural Research (ISRA), Dakar, Senegal, **3** Agro-Biosystems Chemistry - Agronomy, Bioengineering and Chemistry (AgroBioChem), Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege, Gembloux, Belgium, **4** TERRA Teaching and Research Center, FoodsLife Care, Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege, Gembloux, Belgium, **5** Biology Laboratory of Sahelo-Sudanese Animal Populations (BIOPASS) - Research Institute for Development (IRD), Dakar, Senegal

* dethie.ngom@ucad.edu.sn



OPEN ACCESS

Citation: Ngom D, Fauconnier M-L, Malumba P, Dia CAKM, Thiaw C, Sembène M (2020) Varietal susceptibility of maize to larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera; Bostrichidae), based on grain physicochemical parameters. *PLoS ONE* 15(4): e0232164. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232164>

Editor: Craig Eliot Coleman, Brigham Young University, UNITED STATES

Received: September 7, 2019

Accepted: April 8, 2020

Published: April 24, 2020

Peer Review History: PLOS recognizes the benefits of transparency in the peer review process; therefore, we enable the publication of all of the content of peer review and author responses alongside final, published articles. The editorial history of this article is available here: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232164>

Copyright: © 2020 Ngom et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: All relevant data are within the manuscript and its Supporting Information files.

Abstract

Maize (*Zea mays* L) is one of main nutrients sources for humans and animals worldwide. In Africa, storage of maize ensures food resources availability throughout the year. However, it often suffers losses exceeding 20% due to insects such as the larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera; Bostrichidae), major pest of stored maize in the tropical countries. This study aims to select resistant varieties to reduce maize storage losses and explain the physicochemical parameters role in grains susceptibility. In the first study, maize grains were artificially infested under no-choice method with insects. Susceptibility parameters such as weight loss, grain damage, number of emerged insects, median development time and susceptibility index varied significantly through maize varieties. Dobie susceptibility index (SI) was assessed as a major indicator of resistance. The most resistant varieties were Early-Thai, DMR-ES and Tzee-Yellow. Conversely, Synth-9243, Obatampa and Synth-C varieties were susceptible. SWAN, Across-Pool and Tzee-White were classified as moderately resistant varieties. The insect reproductive potential was significantly different in the nine maize varieties and Early-Thai, DMR-ES and Tzee-Yellow varieties were the least favourable host. To assess the relationship between grains physicochemical characteristics and varietal susceptibility, moisture, total phenolics, palmitic acid, proteins, amylose, density and grain hardness were evaluated according to standardized methods. Palmitic acid, SI, insects emerged and grain damage were significantly and positively correlated with each other, and negatively correlated with grains hardness, phenolics and amylose contents. Maize susceptibility index was significantly and negatively correlated to amylose, and phenolics contents and positively correlated to palmitic acid content. This

Manuscript Details

Manuscript number SPR_2019_270

Title Resistance of maize varieties to maize weevil (MW), *Sitophilus zeamais* (Motsch.) (Coleoptera: Curculionidae) and role played by grains physicochemical parameters.

Article type Research Paper

Abstract

Maize (*Zea mays* L.) is the most important food staple in parts of Africa and Mesoamerica providing nutrients for humans. In Sub-Saharan Africa, production is generally seasonal while consumer needs extend throughout the year. Thus, farmers have to store maize to cover lean periods and protect against price fluctuations to ensure food security. However, store maize often encounter losses in excess of 20% due to storage pests such as the maize weevil (MW). This study aims to select resistant varieties to reduce maize storage losses and increasing food shortage. When grains of well characterized nine maize varieties were infested out under no-choice method by MW on laboratory conditions, parameters such as grains weight loss, grains damage, number of emerged insects, median development time and Dobie index of susceptibility varied significantly by varieties. Dobie susceptibility index (SI) was assessed as a major indicator of resistance to MW. The most resistant variety was SWAN (SI= 6.09±1.71). Conversely, Obatampa, Synth-C and Synth-9243 were highly susceptible (SI = 13.51±1.12, 12.22±0.63, 10.87±3.91, respectively). Tzee-White, Across-Pool, DMR-ES, Tzee-Yellow and Early-Thaï varieties were considered susceptible (SI between 7.1 and 10.0). The reproductive potential development of MW was significantly different on the nine varieties and SWAN variety being the least favorable host. To assess the relation of maize susceptibility to physicochemical parameters, moisture, phenolics, palmitic acid, proteins, amylose, density and hardness of grains were evaluated according to standardized methods. Susceptibility index, palmitic acids, number of insects emerged, percents of grain damage and weight loss were significantly and positively correlated with each other, and negatively correlated with hardness, phenolics and amylose contents. Maize susceptibility to weevil was significantly correlated to phenolics content ($\rho = -0.73^{***}$) and grains hardness ($\rho = -0.510^{**}$). The major factors related to maize resistance to *S. zeamais* were grain hardness, amylose and phenolics contents.

Keywords Senegal; Maize storage; post-harvest pests; physicochemical resistance.

Corresponding Author Dethie NGOM

Corresponding Author's Institution Laboratory of Entomology and Acarology, Department of Animal Biology, Sciences and Technics Faculty, Cheikh Anta DIOP University, PO Box 5005 Fann - Dakar, Senegal.

Order of Authors Dethie NGOM, Mbacké Sembène, Cheikh Thiaw, Adiouma G. R. J. Sarr, Papa Seyni Cissokho, Paul Malumba, Marie-Laure Fauconnier

1 **Morphophysical and biochemical traits involved in maize grain varietal susceptibility**
2 **to the maize weevil, *Sitophilus zeamais* (Coleoptera, Curculionidae)**

3 **Déthié Ngom^{1,*}, Marie-Laure Fauconnier², Paul Malumba³, Cheikh Thiaw⁴,**
4 **Thierry Brévault^{5,6}, Mbacké Sembène^{1,5},**

5 ¹Cheikh Anta Diop University, Sciences and Technics Faculty, Department of Animal Biology, PO Box 5005 Fann, Dakar, Senegal.
6 E-mail: dethie.ngom@ucad.edu.sn

7 ²University of Liege, Gembloux Agro-Bio Tech, Department of AgroBioChem, Avenue of Faculty, 2-5030 Gembloux, Belgium.

8 ³University of Liege, Gembloux Agro-Bio Tech, TERRA Teaching and Research Center, Avenue of Faculty, 2B. BE-5030,
9 Gembloux, Belgium.

10 ⁴University El-Hâdj Ibrahima NIASS of Sine Saloum, UFR Agronomy and Crop Production, PO Box 55 Kaolack, Senegal.

11 ⁵Research Institute for Development, BIOPASS, PO Box 1386 Bel-Air, Dakar, Senegal

12 ⁶CIRAD, UPR AIDA, F-34398 Montpellier, France

13
14 **ABSTRACT**

15 **Subject description:** Maize (*Zea mays* L.) is a major staple food providing nutrients for humans and animals worldwide.
16 In Sub-Saharan Africa, maize is stored to ensure food resource availability throughout the year. However, stored-product
17 pests such as the maize weevil, *Sitophilus zeamais* (Motsch.) (Coleoptera: Curculionidae) can cause huge grain losses.

18 **Objectives:** This study aimed to assess the oviposition preference of *Sitophilus zeamais* over maize varieties commonly
19 cultivated in Senegal and the effect of grain morphophysical and biochemical characteristics on their susceptibility to
20 the maize weevil.

21 **Method:** Twenty-five *S. zeamais* pairs (M/F) were placed in the center of an arena at equal distance of small heaps of
22 maize grains (30 g) from nine maize varieties. Adult abundance, damaged grains, grain weight loss, and progeny were
23 confronted to grain characteristics (phenolics and ferulic acid content, hardness, brightness, color and size of grains).

24 **Results:** Susceptibility to the maize weevil varied significantly among maize varieties. Synth-9243 was the most
25 susceptible variety with greatest damaged grains (10.5±2.3 %), grain weight loss (2.3±0.6 %), and progeny (17.3±3.8
26 adults). The least susceptible varieties were Across-Pool, SWAN, Obatampa, and Tzee-Yellow. Grain characteristics
27 such as phenolics and ferulic acid content, were negatively related to susceptibility, but other constituents may have
28 antixenosis or antibiosis effects. In addition, grain brightness may also have a visual effect deterring oviposition.

29 **Conclusions:** More research on the behavioral response of insects is needed to identify volatile organic compounds
30 involved in repellence, but also bioassays to assess anti-feedant properties and toxicity of some compounds for larvae.

31 **Key words:** *Zea mays*; Postharvest; Varietal susceptibility; Insect attractants and repellents

32

Characterization of grains morphophysical factors contributing to susceptibility of maize varieties to storage insects.

Déthié Ngom^{1,*}, Ngagne Demba Sarr¹, Cheikh Thiaw², Toffène Diome¹,
Marie-Laure Fauconnier³, Mbacké Sembène^{1,4},

¹ Department of Animal Biology, Sciences and Technics Faculty, Cheikh Anta DIOP University, Dakar, Senegal.

² University El-Hâdj Ibrahima NIASS of Sine Saloum (USSEIN), Kaolack, Senegal.

³ *AgroBioChem*, Gembloux Agro-Bio Tech, *University of Liege*, Gembloux, Belgium

⁴ BIOPASS, Research Institute for Development (IRD), Dakar, Senegal.

* Corresponding author: dethie.ngom@ucad.edu.sn

ABSTRACT

Maize (*Zea mays* L), one of the most multi utility crops worldwide, is extensively grown in America, Asia and some parts of Africa. It is major source of food, fodder and industrial raw material and is stored in Sub-Saharan Africa to ensure the food resources availability in lean periods. However, stored maize often encounter huge losses due to pests such as insects. Maize is a species with enormous variability in size, structure and color of grain, which are characteristics capable to intervene against external threats such as insect damage. This study aims to measure morpho-physical characteristics involved in maize susceptibility such as size, hardness, density and color parameters of grains. Grains characteristics were measured on whole grains in accordance to standards methods of Association of Official Analytical Chemists Washington, DC, USA632 (A.O.A.C). There were significant differences ($P < 0.01$) among varieties for all morpho-physical parameters. The highest grains grinding time was recorded with SWAN variety (21.53 ± 0.03 s.), followed by Tzee-Yellow (20.69 ± 0.30 s.) then Early-Thai (20.67 ± 0.42 s.), revealing a high grain hardness, major indicator of grain resistance. Conversely, Obatampa variety with grains faster crushed (14.90 ± 0.38 s.), had the softest grains. These significant variations in susceptibility grains factors of maize varieties show a natural capacity of particular varieties to resist against insects. Such sources of resistance may be used as antibiosis and antixenosis mechanisms to reduce maize storage losses.

Key words: *Zea mays*; grain susceptibility factor; morpho-physical characteristics

Evaluation of grains compounds contributing to susceptibility of maize varieties to storage insects.

**Déthié Ngom^{1,*}, Marie-Laure Fauconnier², Cheikh Thiaw³, Ngagne Demba Sarr¹,
Mbacké Sembène^{1,4},**

¹ Department of Animal Biology, Sciences and Technics Faculty, Cheikh Anta DIOP University, Dakar, Senegal.

² *AgroBioChem*, Gembloux Agro-Bio Tech, *University of Liege*, Gembloux, Belgium

³ University El-Hâdj Ibrahima NIASS of Sine Saloum (USSEIN), Kaolack, Senegal.

⁴ BIOPASS, Research Institute for Development (IRD), Dakar, Senegal.

* Corresponding author: dethie.ngom@ucad.edu.sn

Abstract

Maize (*Zea mays* L), major source of food, fodder and industrial raw material worldwide, is often encounter huge losses in storage due to pests such as insects. To reduce these losses, several research on mechanisms that provide host grains resistance against insects were conducted and results revealed an involvement of grains biochemical compounds. The aim of this work was to assess the complex chemicals compounds involved in maize varieties susceptibility to insects. Maize grains were milled using a laboratory mill then grains biochemical composition such as contents of moisture, crude proteins, total starch, crude fat and phenolics were quantified according to standards methods of Association of Official Analytical Chemists Washington, DC, USA632 (A.O.A.C). Significant differences among varieties were recorded for contents of moisture ($P = 0.002$), total phenolics ($P < 0.001$), total starch ($P = 0.003$), crude fat ($P = 0.034$) and crude proteins ($P = 0.004$) of grains. Total phenolics, major indicator of grain resistance was higher in SWAN and Tzee-White varieties ($2864.16 \pm 121.00 \mu\text{g EAG} / \text{g MS}$ and $2405.85 \pm 80.14 \mu\text{g EAG} / \text{g MS}$), 2 times more than that those Synth-9243, Synth-C and Obatampa varieties. The highest proteins content was observed with DMR-ES and Synth-C varieties ($13.69 \pm 0.42\%$, $13.57 \pm 0.05\%$ respectively), unlike Early-Thai and SWAN varieties that registered lowest proteins content ($10.54 \pm 0.85\%$, $10.64 \pm 0.11\%$ respectively). These huge variations of susceptibility factors suggest a natural capacity of particular varieties to resist against insects.

Key words: *Zea mays*; grain susceptibility factor; biochemical characteristics.

Assessment of grains acids involved in susceptibility of maize varieties to storage insects.

Déthié Ngom^{1,*}, Marie-Laure Fauconnier², Mbacké Sembène^{1,3},

¹ Department of Animal Biology, Sciences and Technics Faculty, Cheikh Anta DIOP University, Dakar, Senegal.

² AgroBioChem, Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege, Gembloux, Belgium

³ BIOPASS, Research Institute for Development (IRD), Dakar, Senegal.

* Corresponding author: dethie.ngom@ucad.edu.sn

ABSTRACT

The damage in maize stored for food and feed can go up to 30% or greater of total grains harvested due to pests in developing countries. Thus, several research on mechanisms of host grains resistance against insects were concluded maize biochemical compounds such as acids can play major role in damage during storage. The purpose of this study was to assess the different grains acids that involved in maize varieties susceptibility. Maize grains were milled using a laboratory mill and grains acids such as fatty acids, ferulic acid, p-coumaric acid and amylose were quantified according to standards methods of Association of Official Analytical Chemists Washington, DC, USA632 (A.O.A.C). An analysis by GC-FID indicated presence of ten fatty acids among which there was palmitic acid. This nutritional and functional fatty acid for insects varied significantly ($P < 0.001$) from 16.48 ± 0.04 % to 17.71 ± 0.06 % in fatty acids of maize varieties. The qualitative analysis of phenolic extracts by HPLC showed significant ($P < 0.01$) variations of ferulic acid from 1421.09 ± 256.17 to 3205.06 ± 206.73 $\mu\text{g}/100$ g DM and p-coumaric acid from 387.06 ± 47.59 to 829.25 ± 113.47 $\mu\text{g}/100$ g DM between maize varieties. Such significant variations of susceptibility factors of maize suggested natural capacity of particular varieties to resist against insects for the decrease of maize storage losses.

Key words: *Zea mays*; grain susceptibility factor; maize acids

Sarr ND, Ngom D and Sembène M. (2019). Comparative Study of the Genetic Variability of *Sitophilus zeamais* Subservient to 2 Host Plants (Millet and Maize) in Senegal (West Africa). *American Journal of BioScience*, 7(3):. 71-76.

[doi: 10.11648/j.ajbio.20190703.12](https://doi.org/10.11648/j.ajbio.20190703.12)

American Journal of BioScience

2019; 7(3): 71-76

<http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ajbio>

doi: 10.11648/j.ajbio.20190703.12

ISSN: 2330-0159 (Print); ISSN: 2330-0167 (Online)



Comparative Study of the Genetic Variability of *Sitophilus Zeamais* Subservient to 2 Host Plants (Millet and Maize) in Senegal (West Africa)

Ngagne Demba Sarr[^], Dethie Ngom, Mbacke Sembene

Faculty of Sciences and Technology (Fst), University Cheikh Anta DIOP (UCAD), Dakar, Republic of Senegal

Email address:

ngagnedembasarr@gmail.com (N. D. Sarr)

[^]Corresponding author

To cite this article:

Ngagne Demba Sarr, Dethie Ngom, Mbacke Sembene. Comparative Study of the Genetic Variability of *Sitophilus Zeamais* Subservient to 2 Host Plants (Millet and Maize) in Senegal (West Africa). *American Journal of BioScience*. Vol. 7, No. 3, 2019, pp. 71-76.

doi: 10.11648/j.ajbio.20190703.12

Received: August 21, 2019; **Accepted:** September 20, 2019; **Published:** September 30, 2019

Abstract: Millet and maize, because of the importance of their yields, constitute a reliable alternative to the question of sovereignty and food security. These cereals are exploited in all agroecological zones of Senegal. But their stocks, especially those of maize, are deteriorated by *Sitophilus Zeamais*, a beetle of the Curculionidae. It is therefore necessary to find natural solutions that are healthier than the use of pesticides which is harmful to living beings and the environment. This article makes a comparative study of the genetic diversity of the populations of this insect individually subservient to maize and to millet. The importance of this study is to find a genetic explanation for the differential vulnerability of these host plants to *Sitophilus Zeamais*, because the genetic diversity influences the adaptability of the individual and consequently its development. For this, insects *Sitophilus Zeamais* subservient on the one hand to maize and on the other hand to millet were collected in each agroecological zone. The exploitation of 125 sequences of the Cytochrome B gene corresponding to the individuals, by software of study in population genetics (Bioedit, DNAsp, Mega, Arlequin...) compared to parameters of genetic variability, revealed an approximately similar and high genetic diversity of the 2 populations of millet and maize. Thus, millet and maize genetically have the same effect on the adaptability of *Sitophilus Zeamais*.

Keywords: Cytochrome B, Maize, Millet, *Sitophilus Zeamais*, Genetic Diversity

1. Introduction

In Senegal, maize and millet constitute the food base of households, especially rural households. These 2 cereals occupy respectively 28% and 11% in rural areas against respectively 19% and 5% in urban areas [14]. But their stocks are altered by a powerful pest, a coleopterous beetle of the Curculionidae, named *Sitophilus Zeamais*. According to Ngamo and Hance, losses can range from 25% to 40% in six months of storage [14]. Thus, the extent of the damage threatens the socio-economic function that these cereals can play in a current context of poverty reduction.

The search for solutions to drastically reduce these losses has always been to find the most effective pesticide to eliminate the insect. No genetic study to correlate host plants populations with the extent of damage which they are

individually victim has been done.

Our study aims to identify the host plant most favorable to the survival or extinction of *Sitophilus Zeamais*, by the comparative exploitation of the genetic diversity of the 2 populations of millet and of maize. Indeed, homogeneity and genetic heterogeneity affect the adaptive potential of the insect.

To achieve our objective, we sampled in each agroecological zone insects subservient on the one hand to millet and subservient on the other hand to maize, on stocks and fields widely spaced. A total of 125 individuals were harvested, of which 72 from maize and 53 from millet.

The sequences of the Cytochrome B gene corresponding to these individuals have been exploited by population genetics software (Bioedit, DNAsp, Mega, Harlequin...), with respect to parameters of genetic variability (haplotypic and



Genetic Variability of *Sitophilus zeamais* Subservient to Millet in Senegal (West Africa)

Ngagne Demba SARR*, Toffène DIOME, Déthié NGOM and Mbacke Sembene

Faculty of sciences and Technology, Department of Animal Biology, BIOPASS Laboratory UMR 022 IRD-CBGP, University Cheikh Anta DIOP, Dakar, Senegal

*Corresponding Author E-mail: ngagnedembasarr@gmail.com

Received: xx.xx.2019 | Revised: xx.xx.2019 | Accepted: xx.xx.2019

ABSTRACT

The millet is a plant very adapted to arid climatic conditions. Thus, it is exploited in many agroecological zones (AEZ) of Senegal where the Sahelian to Sahelo-Sudanese climate prevails. After rice, this cereal is the most consumed by Senegalese households. In addition to this vital function, millet plays an important role in the feeding of livestock and poultry. However, it is constantly under attack by pests like *Sitophilus Zeamais*, a beetle of the Curculionidae.

To overcome the enormous damage caused by the insect, without resorting to chemicals products whose use regularly harms living beings and the environment, we tried through this study to highlight the agroecological zones hostile or naturally favorable to the survival of *S. Zeamais*, by the genetic effects they present on its genome.

In fact, populations with low genetic diversity have fewer adaptive potentials than those that are genetically heterogeneous.

Thus, we sampled 43 insects of *S. Zeamais* subservient to millet on stocks infested in 4 agroecological zones that are: NBA¹, SBA¹, SOHC¹ and BMC¹.

The exploitation of the Cytochrome B gene for sequences corresponding to these individuals has revealed a very high genetic homogeneity of SBA and SOHC insects, and a high genetic diversity of the NBA and BMC populations. Thus, the agroecological zones of the SBA and the SOHC, that are less exposed to genetic drift and natural selection, are more hostile to insect survival than NBA and BMC ones, that genetic heterogeneity caused by Genetic fluctuations contributed to the survival of *S. Zeamais*.

Key words: Cytochrome B, Agroecological zone, Millet, *Sitophilus Zeamais*, Genetic diversity.

INTRODUCTION

Millet occupies a substantial place in Senegal's agricultural production. Of all the cereals, it is the most cultivated. A study of the rural economy management centers of the Senegal River Valley (REMC), for the 2012 crop year

revealed that for a production of 1669960 tons of cereals, millet ranks first. The predisposition of millet to evolve in cultivation areas more correctly than other crops without major constraints of growth have both physiological and geographical reasons:

Cite this article: Ngagne Demb. S., Toffène, D., Déthié, N. and Mbacke, S., Genetic Variability of *Sitophilus zeamais* Subservient to Millet in Senegal (West Africa), *Ind. J. Pure App. Biosci.* 7(4): 65-72 (2019). doi: <http://dx.doi.org/10.18782/2320-7051.7696>



RESUME

Le maïs (*Zea mays* L.) est l'un des aliments de base les plus importants dans plusieurs régions d'Amérique et d'Afrique Sub-Saharienne, où il est conservé pour servir de nourriture et couvrir les périodes de soudure. Le charançon, *Sitophilus zeamais* M. et le grand capucin, *Prostephanus truncatus* H. constituent les insectes ravageurs les plus redoutables du maïs entreposé. Ces Coléoptères peuvent engendrer des pertes supérieures à 20% sur le maïs. La protection des denrées stockées est l'un des facteurs essentiels contribuant à la sécurité alimentaire et nutritionnelle. Cette étude vise à identifier des variétés de maïs susceptibles de résister aux attaques de ces insectes et à expliquer le mécanisme morpho-physique et biochimique qui est à l'origine de cette résistance variétale. Neuf variétés de maïs très prisées au Sénégal ont fait l'objet de tests au laboratoire pour évaluer leur niveau de sensibilité aux attaques de *S. zeamais* et de *P. truncatus*. Les paramètres liés aux caractéristiques morphologiques, physiques et biochimiques des grains ont été évalués et corrélés aux paramètres de sensibilité variétale. L'indice de susceptibilité de Dobie (IS), indicateur majeur de la résistance des grains aux insectes, révèle une sensibilité des variétés plus élevée à *S. zeamais* (IS variant de $6,09 \pm 0,29$ à $13,51 \pm 1,12$) qu'à *P. truncatus* (IS variant de $2,85 \pm 0,78$ à $9,76 \pm 0,24$). La variété la plus résistante contre *S. zeamais* est SWAN. Inversement, Obatampa, Synth-C et Synth-9243 sont les variétés les plus sensibles à cette espèce. Le potentiel de reproduction du charançon est significativement différent sur les variétés et SWAN représente l'hôte le moins favorable. Pour *P. truncatus*, les variétés les plus résistantes sont Early-Thaï, DMR-ES et Tzee-Yellow, contrairement à Synth-9243, Obatampa et Synth-C qui sont les plus sensibles pour cette espèce. Les capacités reproductives de l'insecte diffèrent significativement entre les variétés avec Early-Thaï, DMR-ES et Tzee-Yellow comme les hôtes les moins favorables. Les paramètres morpho-physiques et biochimiques des grains ont été évalués selon des méthodes normalisées. L'analyse des liaisons indique que la sensibilité (IS) du maïs au charançon est liée aux polyphénols ($\rho = -0,693^{***}$), à la dureté ($\rho = -0,510^{**}$) et à l'acide palmitique ($\rho = 0,659^{***}$) des grains. La descendance de l'insecte en F₁ est négativement affectée par les polyphénols, la couleur jaune, la dureté et positivement liée à l'acide palmitique, à la couleur blanche et aux protéines des grains. En ce qui concerne *P. truncatus*, l'IS du maïs est lié à l'amylose ($\rho = -0,577^{**}$), à la couleur jaune ($\rho = -0,538^{**}$), aux polyphénols ($\rho = -0,451^*$), à l'acide palmitique ($\rho = 0,475^*$) et au volume ($\rho = 0,405^*$) des grains. Ses émergences F₁ sont négativement affectées par la couleur jaune, la pureté de la couleur, l'amylose et la dureté, et positivement lié à l'acide palmitique et au volume des grains. Le niveau d'attaque des grains n'est affecté significativement qu'avec les teneurs en acide béhénique ($\rho = -0,575^{**}$) et en protéines ($\rho = 0,394^*$) des grains. Le maïs le plus résistant contre *P. truncatus* peut être décrit comme une variété à grains durs avec des teneurs élevées en amylose et en polyphénols. Quant au maïs résistant contre *S. zeamais*, la teneur élevée en polyphénols et les grains durs sont les principaux indicateurs. La sensibilité de la variété à l'infestation de ces espèces augmente fortement avec la teneur en acide palmitique de ses grains.

Mots clés: Sénégal ; *Zea mays* ; Stockage ; Ravageurs post-récolte ; Résistance physico-chimique.

Thesis Title: Morpho-physical and biochemical characteristics for maize varietal susceptibility to stored food pests and interactions between insects.

ABSTRACT

Maize (*Zea mays* L.) is one of most important staple foods in many regions of America and sub-Saharan Africa, where it is a food resource and used to cover lean periods. The maize weevil (MW), *Sitophilus zeamais* M. and the larger grain borer (LGB), *Prostephanus truncatus* H. are the majors insects pests of stored maize. These beetles can cause losses greater than 20% on maize. Protection of stored food is one of majors factors contributing to food and nutrition security. This study aims to identify maize varieties that can minimize these insects attacks and to explain morpho-physical and biochemical mechanism of this varietal resistance. Nine maize varieties extensively taken in Senegal were tested in laboratory to assess their susceptibility to attack and reproductive behavior of *S. zeamais* and *P. truncatus*. The parameters related to morphological, physical and biochemical characteristics of grains were evaluated and correlated with susceptibility parameters. The Dobie susceptibility index (SI), major indicator of grain resistance to insects, reveals higher susceptibility of varieties to MW (SI from 6.09 ± 0.29 to 13.51 ± 1.12) than LGB (SI from 2.85 ± 0.78 to 9.76 ± 0.24). The most resistant variety against MW is SWAN. Conversely, Obatampa, Synth-C and Synth-9243 are the most susceptible varieties to this species infestation. The reproductive potential of MW is significantly different on varieties and SWAN being the least favorable host. For LGB, the most resistant varieties are Early-Thai, DMR-ES and Tzee-Yellow, whereas Synth-9243, Obatampa and Synth-C are the most susceptible varieties for this species. The reproductive capacity of this insect differs significantly between varieties with Early-Thai, DMR-ES and Tzee-Yellow the least favorable hosts. The grains morpho-physical and biochemical parameters were evaluated according to standardized methods. Correlations analyses indicates maize susceptibility (SI) to MW is related to phenolics ($\rho = -0.693^{***}$), hardness ($\rho = -0.510^{**}$) and to palmitic acid ($\rho = 0.659^{***}$) of grains. F₁ progeny emerged are negatively affected by phenolics, yellow color, hardness and positively related to palmitic acid, white color and proteins of grains. For LGB, maize susceptibility index is related to amylose ($\rho = -0.577^{**}$), yellow color ($\rho = -0.538^{**}$), phenolics ($\rho = -0.451^*$), palmitic acid ($\rho = 0.475^*$) and volume ($\rho = 0.405^*$) of grains. Its emergences in F₁ are negatively affected by yellow color, color purity, amylose and hardness, and positively related to palmitic acid and volume of grains. The percent of grains attacked is only significantly affected with behenic acid ($\rho = -0.575^{**}$) and proteins ($\rho = 0.394^*$) contents of grains. The most resistant maize against *P. truncatus* can be described as a variety with hard grain and highs amylose and polyphenols contents. As for maize resistant against *S. zeamais*, high content of polyphenols and hard grains are main indicators. Variety susceptibility by these species increases with palmitic acid content of its grains.

Key Words: Senegal, *Zea mays*, Storage, Postharvest pests, Physicochemical resistance.