

Sommaire :

Liste des acronymes	iii
INTRODUCTION	1
I. RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES	3
I.1 Dynamique de l'arachide ces dernières années	3
I.1.1 Production.....	3
I.1.2 Commercialisation.....	4
I.2 Aflatoxines totales (AFT).....	4
I.2.1 Propriétés physico-chimiques des aflatoxines.....	5
I.2.2 Analyse de l'aflatoxine.....	6
I.3 Rappel de la toxicocinétique des aflatoxines	8
I.3.1 Absorption	8
I.3.2 Distribution.....	9
I.3.3 Métabolisation (biotransformation).....	9
I.3.4 Elimination	10
I.4 Consommateurs.....	13
I.5 Chaîne de contamination.....	13
I.5.1 Contamination avant la récolte/Parasitisme	13
I.5.2 Contamination après la récolte/stockage	14
I.6 Facteurs et risques de contamination	15
I.6.1 Situation géo-climatique.....	15
I.6.2 Détoxification/triage.....	17
I.6.3 Chaîne de production.....	16
I.7 Provenance/localité	18
II. APPROCHE METHODOLOGIQUE.....	20
II.1 Objectifs	20
II.2 Cadre de l'étude	20
II.3 Type d'étude.....	21
II.4 Echantillonnage.....	21
II.5 Collecte des données	21
II.6 Analyse des données	21
II.6.1 Description opérationnelle des variables utilisées dans la régression	22
1. Variable dépendante	22
2. Variable explicative.....	22

III. RESULTATS.....	23
III.1 Analyse descriptive univariée	23
III.2 Analyse descriptives bivariées	24
III.3 Mesure d'association et comparaison des variables qualitatives	27
III.4 Analyse Explicatives par régression logistique.....	28
IV. DISCUSSION.....	29
CONCLUSION.....	32
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE :	33
V. ANNEXE : MATRICE.....	34

Introduction

Les aflatoxines sont des substances toxiques produites secondairement par certains types de champignons (moisissures) qui appartiennent au règne fongique, du sous-règne des Ascomycètes, de la classe des Eurotiomicètes, de l'ordre des Eurotiales et de la famille des Trichocomaceae. Elles sont présentes naturellement partout dans le monde ; elles peuvent contaminer les cultures alimentaires et constituent une menace grave pour les humains et les animaux (*FAO/WHO, 2018*).

Cependant, les aflatoxines produites par *Aspergillus flavus* et *A. parasiticus*, qui contaminent de nombreuses denrées (céréales, fruits secs, coton) et dont l'arachide constitue le substrat de prédilection, retiennent davantage l'attention des consommateurs, des exportateurs et des importateurs en raison de leur forte toxicité et du risque sanitaire (effet cancérogène) qu'elles engendrent aussi bien chez l'homme que chez l'animal (*ISRA, ITA, CIRAD, 2005*).

Le danger des aflatoxines a été signalé pour la première fois en 1960, en Angleterre, lors d'une hécatombe dans des élevages de dindes soumises à une ration à base de farine de tourteaux d'arachide contaminée par cette toxine (*Dieme et al, 2017*). Cependant des années sont passées mais la question sur les aflatoxines reste toujours d'actualité dans tous les domaines, de sorte qu'aujourd'hui, la cancérogénicité de l'aflatoxine B1 n'est plus à démontrer, puisqu'elle a même été classée cancérogène avéré pour l'homme (groupe 1) depuis 1993 de même que l'aflatoxine G1 dans le groupe 3 (agent inclassable quant à sa cancérogénicité) par le IARC (*Dieme et al, 2017*).

Au lendemain de l'indépendance, en 1960, la culture de l'arachide occupait une place de choix au sein des productions agricoles du Sénégal. Avec une production de 900 000 à 1 000 000 t, elle assurait jusqu'à 80 % des exportations et constituait la principale source de revenus en milieu rural (*ISRA, ITA, CIRAD, 2005*). Cependant, toutes les exportations de produit arachidier sont régies par une législation sur les aflatoxines. Pour l'Europe, le Règlement (UE) no 165/2010 de la commission du 26 février 2010, fixe les teneurs maximales admissibles à 15 ppb pour les quatre aflatoxines, au même titre que le codex Alimentarius. Cette norme n'est tout de même valable que pour les arachides qui doivent subir un traitement ultérieur susceptible de réduire le niveau de contamination. Par ailleurs les Etats-Unis et la Chine admettent une teneur de 20 ppb pour les mêmes produits contrairement à l'Europe et au codex.

En terme monétaire, plus de 128 millions US dollars soit près de 64 milliards de francs CFA sont perdus par an. Il est à noter aussi que le coût de l'inaction est estimé au minimum à 46 milliards de francs CFA et au maximum à 81 milliards de francs CFA, soit 0,6 à 1,1 % du PIB (*PACA/UA-BIRA, 2016*). Le coût de l'action par la mise en place et l'application de normes au seuil de 20 ppb s'élève à 21 milliards de francs CFA et cause beaucoup de perte (*PACA/UA-BIRA, 2016*).

Une grande partie des mathématiques appliquées consiste, d'une certaine façon, à faire de la modélisation, c'est-à-dire à définir un (ou plusieurs) modèle(s), de nature mathématique, permettant de rendre compte d'une manière suffisamment générale d'un phénomène donné, qu'il soit physique, biologique, économique ou autre (*wikistat.fr consulté le 20/02/2020*). Cependant, dans cette étude il ne s'agit pas de définir un modèle mathématique, mais d'utiliser la régression logistique, qui est une étape de la modélisation, pour évaluer le dépassement de la norme de référence du codex des arachides du Sénégal durant ces trois dernières années (2017,2018 et 2019).

Pour ce faire, nous allons suivre le plan ci-après : après l'introduction, nous allons faire un rappel de la bibliographie, ensuite donner la méthodologie de travail, juste après nous allons donner le résultat, et enfin conclure après avoir discuté de nos résultats.

I. Rappels bibliographiques

I.1 Dynamique de l'arachide ces dernières années

L'arachide, *Arachis hypogaea* L, est une plante oléagineuse originaire d'Amérique du Sud, introduite en Afrique de l'Ouest au XVI^e siècle. Elle contient 48–50 % de corps gras, 26–28 % de protéines et est riche en fibres, minéraux et vitamines (*Noba et al, 2014*).

L'arachide constitue la sixième culture parmi les plantes oléagineuses cultivées les plus importantes dans le monde (*Noba et al, 2014*). Ainsi, elle est cultivée sur 26,4 millions d'hectares avec une production totale en progression de 37,1 millions de tonnes et une productivité moyenne de 1,4 tonnes à l'hectare (*Noba et al, 2014*). Les pays en voie de développement détiennent 97 % de la superficie et 94 % de la production globale de cette culture (*Noba et al, 2014*), malgré cette vaste étendue arable et cette part non-négligeable à la production de l'arachide, il manque énormément de moyen à l'Afrique, contrairement à l'Inde et à la Chine qui fournissent à eux seules plus de 60 % de la production (*Noba et al, 2014*), contre 25 % pour l'Afrique repartie entre notamment le Nigéria, le Sénégal, le Soudan et le Niger qui sont les principaux exportateurs (*Noba et al, 2014*).

L'extension de sa culture au Sénégal s'explique par la volonté de développer sa production à des fins de transformation industrielle (*Gillier Pierre, Silvestre Pierre, 1969*). Elle est alors, à travers des procédés industriels ou artisanaux transformée en huile réputée pour sa stabilité à la chaleur grâce à sa bonne teneur en acide oléique, en tourteau très apprécié en alimentation animale et en pâte d'arachide. Cette forme de valorisation a élevé l'arachide au rang de première culture industrielle du pays, ce qui fait d'elle au Sénégal, ce que le cacao est pour la Côte d'Ivoire, autrement dit c'est la base de son économie rurale voir même nationale.

I.1.1 Production

Dans le rapport de l'ANSD sur le bulletin mensuel des statistiques économiques de janvier 2019, le Sénégal a produit lors de la campagne 2017/2018, 1 405 223 tonnes sur une superficie de 1 245 048 Ha. Pour la campagne de 2018/2019, la production avait atteint les 1 432 086 tonnes sur une superficie de 1 134 330 Ha (*Ndir, 2019*). Pour cette dernière, les localités comme Diourbel, Kaolack, Kolda et Louga ont produit respectivement, 57 378 , 223 001 , 225 654 , 61 272 tonnes d'arachide sur des superficies respectives de 69 446, 169 843, 123 521 et 102 759 Ha (*Ndir, 2019*).

I.1.2 Commercialisation

Toutes les parties de la plante font l'objet des utilisations les plus diverses. En effet, elle fait vivre tout le Sénégal, et représente 70 % du revenu monétaire des paysans, et près de 40 % des recettes directes et indirectes du budget ; toutes les activités parallèles du Sénégal vivent au rythme du flux monétaire pulsé par l'arachide, qui est le moteur économique et le cœur vivant de sa vie économique (*le monde diplomatique, 1965*). La commercialisation de cette denrée est faite à l'intérieur comme à l'extérieur du pays.

- **Intérieur**

La commercialisation de l'arachide à l'intérieur du pays tourne principalement autour des huiliers qui sont majoritairement représentés par la SUNEOR ex SONACOS et les marchés locaux.

- ✓ Les huiliers : ils assurent la transformation industrielle et produisent principalement de l'huile et d'autres dérivés, l'autre partie de cette transformation est assurée par les industries agroalimentaires, qui produisent de la pâte à tartine et de l'alimentation du bétail.
- ✓ Les marchés hebdomadaires : ils sont le lieu, où les produits à transformation locale sont présentés notamment les fans d'arachide qui sont longtemps utilisés par les populations sénégalaises, rurales en particulier pour l'embouche ovine à l'échelle familiale.

- **Extérieur**

Jusqu'aux années 1990, le Sénégal fournissait la plus grande part des exportations de l'arachide de l'Afrique de l'Ouest (*Noba et al, 2014*). Mais en 2011, cette exportation n'a représenté que 4 %, le Sénégal est d'ailleurs devenu le 2e exportateur africain derrière le Nigeria (*Noba et al, 2014*). En effet, 345 539 tonnes d'arachide en coque ont été expédiées à l'étranger en 2016 (*Sene et al, 2016*). Au même moment, 98 647 tonnes d'arachide non grillées ont été exportées la même année, soit une baisse de 23,3 % par rapport à 2015 (*Sene et al, 2016*). Cette baisse a pratiquement touché toutes les années qui ont suivi.

I.2 Aflatoxines totales (AFT)

La toxicologie est l'étude des substances toxiques et plus précisément de l'identification et de l'évaluation quantitative des conséquences néfastes liées à l'exposition à des agents physiques, chimiques ou de toute autre nature (<http://www.ilocis.org/fr> consulté 03/12/2020). Cette définition est au cœur de notre travail. L'aflatoxine fut d'ailleurs identifiée pour la première fois en 1960.

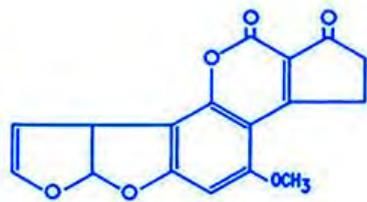
I.2.1 Propriétés physico-chimiques des aflatoxines

Les aflatoxines sont des molécules de faible poids moléculaire (312 à 330 g/mol), très peu solubles dans l'eau, insolubles dans les solvants non-polaires (*Anses, 2012*). Elles sont fluorescentes sous lumière ultra-violette (UV longs), (bleue pour les AFB "blue" et verte pour les AFG "green", l'AFM1 ayant une fluorescence bleu-mauve) (*Afssa, 2009*).

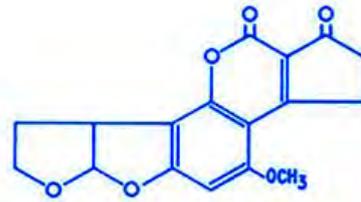
Le tableau 1 récapitule quelques informations essentielles des aflatoxines, telle que le n° CAS (Chemical Abstracts Service), la formule chimique brute et la masse molaire en g/mol, suivie de la figure 1 qui montre leurs formules semi développées.

Tableau 1 : numéro CAS et formule brute des différentes aflatoxines, (Aflatoxines M-45 - MétroPol - INRS s. d.), consulté le 29/03/2020 à 11h GMT)

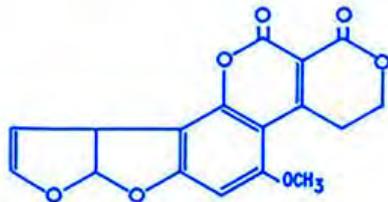
NOM	N° CAS	FORMULE CHIMIQUE	MASSE MOLAIRE
Aflatoxine B1	1162-65-8	C ₁₇ H ₁₂ O ₆	312,27
Aflatoxine B2	7220-81-7	C ₁₇ H ₁₄ O ₆	314,29
Aflatoxine G1	1165-39-5	C ₁₇ H ₁₂ O ₇	328,27
Aflatoxine G2	7241-98-7	C ₁₇ H ₁₄ O ₇	330,29



Aflatoxin B1



Aflatoxin B2



Aflatoxin G1



Aflatoxin G2

Figure 1 : formules semi développées des aflatoxines, (Symmetric Total ES | Prognosis Biotech s. d.), consulté le 07/04/200 à 21h18 GMT)

I.2.2 Analyse de l'aflatoxine

Des procédures d'analyse et d'échantillonnage aux aflatoxines, spécifiques à certaines matrices ont été élaborées. Par contre en matière d'aflatoxine, le laboratoire de mycotoxines se rapporte au codex Alimentarius. Le laboratoire de mycotoxines est par ailleurs accrédité ISO 17025 par le cofrac avec la méthode *NF EN 14 123*, qu'il utilise pour l'analyse des aflatoxines. Avec cette méthode, le dosage est fait par la Chromatographie Liquide Haute Performance (CLHP), dont le principe est basé sur la séparation des éléments d'un mélange via leurs différences physico-chimiques.

Tableau 2 : matériels et réactifs de l'analyse des aflatoxines

Réactifs	Matériels
Eau	Balance numérique
Méthanol	Bassine
N hexane	Bécher de 50ml
Sel (NaCl)	Broyeur (5kg et 2kg)
Solution tampon de PBS	Flacon de 100ml
	Fiole jaugée
	Homogénéisateur
	Papier filtre
	Pot avec couvercle
	Spatule
	HPCL

L'arachide est d'abord pesée au poste Myco-P1 à l'aide de la balance numérique pour connaître le poids total, ce n'est qu'après cela, qu'on va broyer 5 kg au maximum. Néanmoins selon le poids, on utilise le broyeur adéquat. Puis on remplit le pot à couvercle, de la pâte obtenue du broyage.

Ensuite au poste Myco-P2, on prépare l'échantillon au dosage : avec l'aide d'une spatule on fait une prise d'essai de 50 g de la pâte plus 5 g de sel (NaCl) dans un bécher de 50 ml (*figure 2*), on y ajoute 200 ml de méthanol et 100 ml de N hexane, le tout est homogénéisé à l'aide d'un homogénéisateur (*figure 3*). On filtre le mélange à travers un papier filtre dans un flacon de 100 ml, on prélève 10 ml du filtra dans un bécher, on y ajoute 60 ml de solution PBS (Phosphate Buffered Saline). Enfin à travers une colonne d'adsorption, on fait passer le contenu du bécher pour piéger l'aflatoxine, elle est décrochée dans une toute petite fiole à jaugé à l'aide du méthanol et de l'eau. Et au poste Myco-P4, on injecte analyte dans l'HPLC pour le doser.



Figure 2 : 50g de l'arachide broyée



Figure 3 : homogénéisation du PR

I.3 Rappel de la toxicocinétique des aflatoxines

L'effet d'un toxique dépend en grande partie à sa concentration au niveau de son site d'action (<http://www.ilocis.org/fr> consulté 03/12/2020). À travers la toxicocinétique il est possible de connaître le devenir du toxique dans l'organisme, grâce à ces processus interdépendants que sont : l'Absorption, la Diffusion, le Métabolisme et l'Élimination (ADME) (figure 4).

I.3.1 Absorption

L'absorption est l'incorporation d'une substance par l'organisme (<http://www.ilocis.org/fr> consulté 03/12/2020). Pour les aflatoxines, trois voies majeures d'absorption sont connues : la voie orale, pulmonaire et cutané.

✓ La voie digestive ou orale

Elle est la principale voie auprès des populations, parce qu'elle survient avec la consommation d'une denrée contaminée aux aflatoxines. Par ailleurs, toutes les substances solubles sont efficacement absorbées dans l'appareil gastro-intestinal. En effet, le pH de l'intestin facilite l'absorption de certains toxiques, comme les aflatoxines qui sont absorbées au niveau du duodénum (Afssa, 2009).

✓ La voie respiratoire ou pulmonaire

Au-delà de l'exposition alimentaire qui concerne les toxines, l'Homme peut s'exposer par voie pulmonaire (inhalation) aux conidies d'*A. flavus*. Cependant il est vrai que les mycotoxines ne sont pas volatiles, mais une absorption pulmonaire peut avoir lieu avec des conidies sous forme de spores qui constituent un des principaux agents allergènes des aspergilloses bronchiques (Anses, 2012).

✓ La voie cutanée

Tout comme les voies respiratoires et orales, celle cutanée peut aussi être une source d'exposition humaine, surtout en milieu professionnel avec les agents du secteur agricole (fermier, éleveur d'animaux, etc.) ou encore les agents des laboratoires d'analyse de recherche et de contrôle dans les industries agroalimentaires, où une application des conidies sur la peau est fréquente (**Brochard et Le Bacle, 2009**), surtout quand les équipements de protection font défaut ou laisse à désirer.

I.3.2 Distribution

La distribution d'une substance dans l'organisme est un processus dynamique dépendant des vitesses de captation tissulaire et d'élimination, du flux sanguin vers les différents tissus et de l'affinité de ces derniers pour la substance (<http://www.ilocis.org/fr> consulté 03/12/2020). Après absorption, les aflatoxines sont fixées sur des protéines plasmatiques et véhiculées partout dans l'organisme. C'est le cas de l'AFB1 liée à l'albumine, pour laquelle il a été montré que celle-ci est la protéine de fixation la plus significative, cette liaison est d'ailleurs localisée au niveau de la lysine (LYS) de cette protéine (**Qian et al, 2013**).

La distribution des AFT est rapide, car elles sont des molécules très lipophiles, et sont stockés principalement dans le foie, les reins, le tissu musculaire et adipeux (**Bensakhria, 2018**). Le passage transplacentaire de ces molécules est également possible.

I.3.3 Métabolisation (biotransformation).

La biotransformation est un processus qui mène à la transformation métabolique de composés étrangers (xénobiotiques) dans l'organisme. En règle générale, le métabolisme convertit les xénobiotiques liposolubles en métabolites hydrosolubles, de poids moléculaire plus élevé et faciles à éliminer (<http://www.ilocis.org/fr> consulté 03/12/2020). Les aflatoxines en particulier l'AFB1 qui a été la plus étudiée, subissent un métabolisme hépatique rapide se déroulant en deux phases (**Afssa, 2009**) :

✓ Une phase I de biotransformation :

Qui met en jeu les enzymes mono-oxygénases à cytochromes P450 (CYP). La voie dominante de l'activation in vivo de l'AFB1 dans le foie humain se ferait par le CYP1A2 au travers des réactions d'oxydation formant par hydroxylation l'AFM1 et par époxydation l'AFB1 8,9 époxyde (**Afssa, 2009**), (figure 5).

Le CYP3A4 dont l'action serait moins prépondérante, se trouve impliqué dans la formation par hydroxylation de la 3 α -hydroxyAFB1 (AFQ1) et plus modestement dans la synthèse de l'AFB1 8,9 époxyde. Dans cette phase, deux autres métabolisations enzymatiques de l'AFB1 interviennent : une O-dé-méthylation pour former l'AFP1 et une réduction de la fonction cétone en C1 (via une NADPH réductase) pour former l'aflatoxicol (AFOL).

Les métabolites AFM1, AFP1 et AFQ1 sont éliminés dans les urines des mammifères exposés à l'AFB1, seule l'AFM1 est éliminée dans le lait. La présence de ces métabolites dans les urines et de l'AFM1 dans le lait et dans le sérum, peut servir de bio-indicateur d'exposition (*Afssa, 2009*).

✓ Une phase II du métabolisme :

Concerne le devenir de l'AFB1 8,9 époxyde. Elle comprend la conjugaison de celui-ci au glutathion par des glutathion S-transférases (GST). Une conjugaison à l'acide glucuronique des métabolites hydroxylés aboutit à la formation de glucurono-conjugués. Elle comporte aussi l'association de l'AFB1 8,9 époxyde aux acides nucléiques (ADN), engendrant la toxicité dont notamment la génotoxicité et la cancérogénicité. Le site de formation d'adduits à l'ADN se situe en position N7 de la guanine (*Afssa, 2009*). Cette alternative de devenir de l'AFB1 8,9 époxyde entre glucurono-conjugaison et association à l'ADN, se traduit selon l'espèce animale et selon des situations particulières (déficit physiologique du foie, apport très important en toxines, polymorphisme des GST...) une variabilité de la sensibilité aux aflatoxines. Par conséquent, la génotoxicité des aflatoxines est due à la métabolisation de l'AFB1 en AFB1 8,9 époxyde caractérisé par une durée de vie courte, mais hautement réactif. Il est ainsi considéré comme le principal métabolite génotoxique par fixation à l'ADN (*Afssa, 2009*).

I.3.4 Elimination

Un toxique peut être éliminé simultanément par deux ou plusieurs voies d'excrétion (<http://www.ilocis.org/fr> consulté 03/12/2020), cependant, une voie est généralement prédominante.

Les aflatoxines sont, 15 à 25 % libres ou conjuguées éliminées par la voie urinaire (*Bensakhria, 2018*). Néanmoins, l'élimination des aflatoxines se fait aussi par voie biliaire sous forme conjuguée au glutathion, glucurono et sulfoconjugués qui représente 50 % de l'élimination totale (*Bensakhria, 2018*). Quant à l'excrétion de l'aflatoxine M1 dans le lait, qui est une autre forme d'élimination, elle est proportionnelle à la quantité (Qt) d'aflatoxine B1 ingérée (*Bensakhria, 2018*).

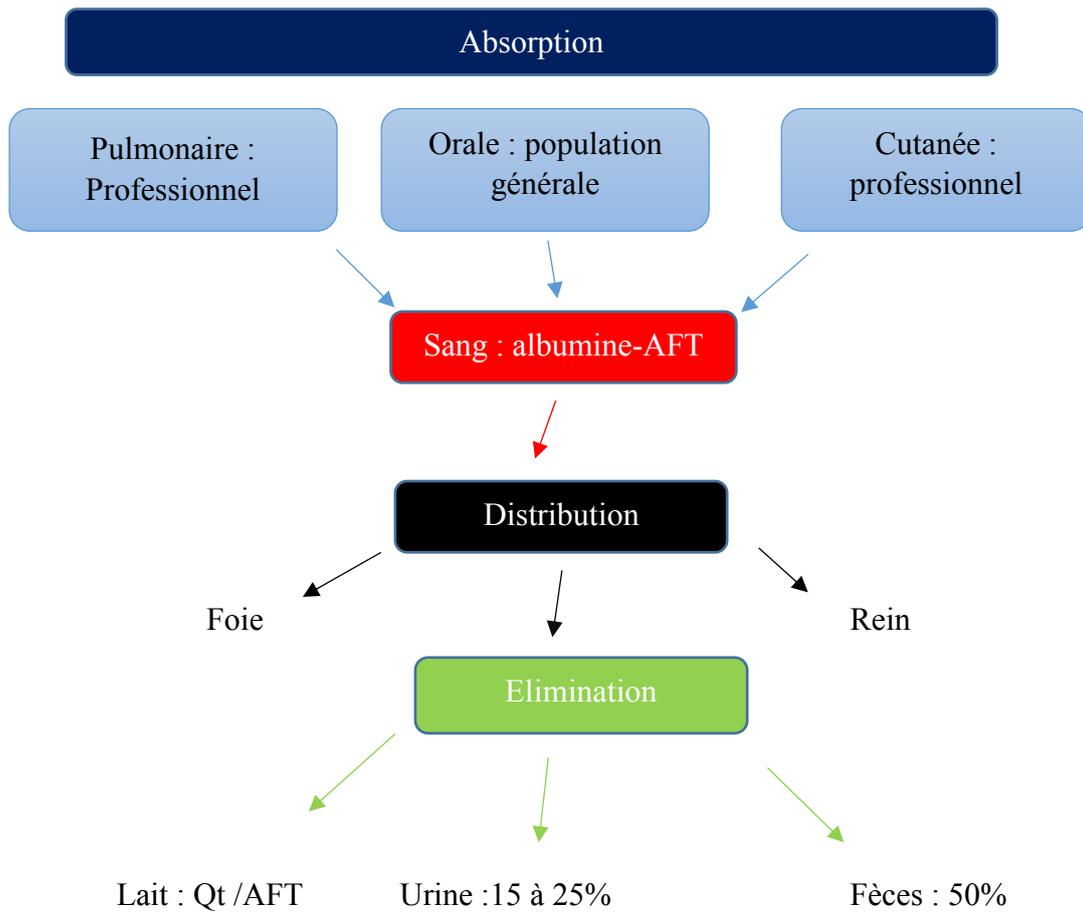


Figure 4 : toxicocinétique (ADME) de l'aflatoxine

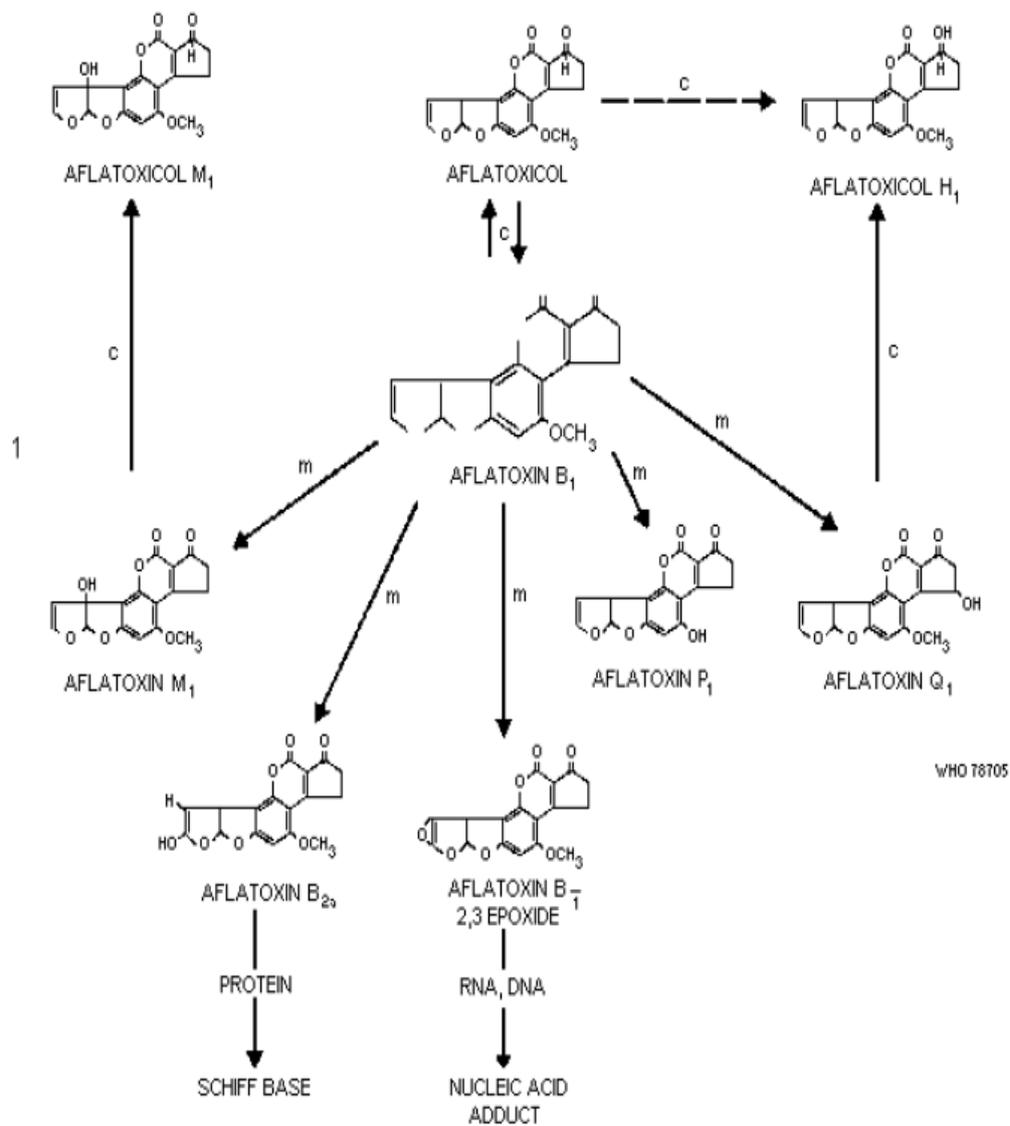


Figure 5 : métabolisme de l'aflatoxine dans le foie, Rapport de l'IPCS Environmental Health Criteria N°11, WHO, 1979

I.4 Consommateurs

La dernière intoxication aiguë reconnue s'est déroulée d'avril à septembre 2004 dans les provinces du centre et de l'est du Kenya durant laquelle 341 cas ont été diagnostiqués conduisant à 123 décès (*Anses, 2012*). À l'heure actuelle deux syndromes humains d'étiologie indéfinie ont été reliés à l'ingestion d'aliments contaminés par les aflatoxines : le Kwashiorkor qui associe hypoalbuminémie et immunodépression et le syndrome de Reye qui associe l'encéphalopathie et la dégénérescence des viscères, chez les enfants (*Anses, 2012*).

Au Sénégal, les conséquences sanitaires d'une exposition de longue durée ou chronique aux aflatoxines n'est plus à prouver, dans certaines parties du pays. Les localités comme Kédougou, Kaffrine, Kaolack et Tambacounda (*PACA/UA-BIRA, 2016*) sont les plus exposées à cause de leur régime alimentaire qui combine à la fois arachide et mil. Cependant ces produits sont les plus contaminés et consommés dans ces zones à cause de leurs fortes productions.

Les aflatoxines comptent parmi les premières causes du cancer du foie (*OMS, 2017*). Ceci est plus accentué en présence d'une infection à l'hépatite B, d'ailleurs il y a eu 1.34 millions de décès dus aux hépatites virales en 2015 (*OMS, 2017*). Au Sénégal, d'après les chiffres du programme national de lutte contre les hépatites, la prévalence de l'hépatite B serait estimée à 10 %.

I.5 Chaîne de contamination

Elle est longue, mais elle se situe principalement à deux niveaux : la contamination avant la récolte et celle après la récolte.

I.5.1 Contamination avant la récolte/Parasitisme

De nombreux travaux réalisés dans les années 80 ont montré que les graines peuvent être infectées par *Aspergillus* dans le sol en l'absence de dégât apparent sur les gousses (*Martin et al, 1999*). Ainsi des contaminations avant la récolte sont néanmoins possibles, en particulier lorsqu'une longue sécheresse de fin de cycle assèche et réchauffe le sol (*Martin et al, 1999*). De même, les réactions de défense des plantes ne peuvent empêcher la colonisation lorsque les graines subissent dans le sol une forte infection fongique à la suite d'attaques d'insectes ou de myriapodes ou de lésions d'instruments aratoires (*Martin et al, 1999*). Cependant, de nos jours, le problème de la sécheresse a été corrigé par la création de variété de cycles court et adapté à la sécheresse, mais le problème des insectes persiste toujours.

I.5.2 Contamination après la récolte/stockage

La réhydratation des arachides peut intervenir à partir de l'eau atmosphérique ou par transfert de vapeur d'eau au sein du stock entre les points chauds et froids (*Martin et al, 1999*). Pour des graines entreposées à 30 °C, une humidité relative de l'air supérieure à 84 ± 1 % est nécessaire (*Martin et al, 1999*). Bien que la croissance du champignon soit possible entre 13 et 41 °C (*Martin et al, 1999*), une plage restreinte de températures, entre 25 et 32 °C est nécessaire pour qu'il y ait une production d'aflatoxines (*Martin et al, 1999*). En conditions favorables, celle-ci peut avoir lieu dès le quatrième jour après l'infection fongique (*Martin et al, 1999*). Ces conditions sont généralement retrouvées dans les entrepôts du pays communément appelé secco (*Figure 6 : exemple secco de Gossas*), favorisant ainsi la contamination de l'arachide.



Figure 6 : secco de Gossas (entrepôt d'arachide de Gossas)

I.6 Facteurs et risques de contamination

Le tableau 3 intitulé origine et risque de contamination des arachides aux aflatoxines, consigne quelques facteurs clés de la contamination et décrit ceux-ci par rapport aux risques et origines. Il est inspiré de l'étude faite sur la fiche sanitaire sur les coproduits : Aflatoxine B1/M1 (ADEME, 2011).

Tableau 3 : origines et risques de contamination des arachides aux aflatoxines

Origine	Situation géo-climatique	Chaîne de production			
		Champs	Triage	Stockage	Transport
Localité					
Diourbel	++	+	-	+++	+/-
Kaolack	++	+	-	+++	+/-
Kolda	++	+	-	+++	+
Louga	++	+	-	+++	+/-
Touba	++	+	-	+++	+/-

+++ : risque très élevé ; ++ : risque élevé ; + : risque modéré ; +/- : risque faible ; - : risque réduit à 95%.

I.6.1 Situation géo-climatique

Les caractéristiques de croissance et de toxinogénèse des *Aspergillus* qui sont présentes en Afrique plus particulièrement au Sénégal sont en effet dues à la contrainte natu

relle, liée à la position géographique de l'Afrique qui est située entre les latitudes 40 °N et 40 °S (Dieme et al, 2017). Par conséquent, ceci rend cette zone chaude et humide et favorable à la production des aflatoxines. La quasi permanence de ces conditions, nous pousse à dire que le risque de contamination est élevé comme le renseigne le tableau 3 ci-dessus.

Au Sénégal, c'est l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) qui assure la production de donnée météorologique, conformément aux normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Ainsi selon les rapports de l'ANACIM sur les bulletins climatiques produisent entre 2017 et 2019, on a :

- ✓ En 2018 les moyennes des températures minimales qui ont évolué entre 22° C et 27° C sur l'ensemble du territoire et les maximales entre 30° et 40° C.

Ceci est également valable pour les années 2019 et 2017 avec de légères variations et des anomalies de température qui peuvent survenir.

- ✓ Quant à l'humidité, elle a varié entre 24 % et 85 % environs avec toujours des différences inter-localités et saisonnières.

Par ailleurs les conditions physiques et climatiques favorables à l'émergence des *Aspergillus* et à leurs productions d'aflatoxine (toxicogénèse) sont bien connues (tableau 4).

Tableau 4 : caractéristiques de croissance et de Toxicogénèse d'*Aspergillus flavus* (ANSEE, 2012)

Croissance	Min	Opt	Max
Température (°C)	10-12	33	43-48
pH	2,1	7,5	11,2
a_w	0,78-0,84	0,97	/
Toxicogénèse	Min	Opt	Max
Température (°C)	13	16-31	37
a_w	0,82	0,95-0,99	/

I.6.2 Chaîne de production

Cette chaîne dans notre étude, va du champ au transport en passant par le stockage.

✓ Au champ

En principe, il est noté que les aflatoxines sont produites principalement lors du stockage et non au champ, par contre l'infestation et la colonisation à *l'Aspergillus* a eu lieu au champ (Martin et al, 1999). Cependant, au champ, les insectes attaquent la surface des grains facilitant l'accès de la moisissure aux structures internes qui contiennent les nutriments et augmente le risque de contamination de la partie comestible. Malgré tous, le risque de contamination au champ est modéré dans le tableau 3 ci-dessus, puisque cette infestation/colonisation de *l'Aspergillus* peut être éliminée par le nettoyage des graines ou encore par le triage. Tout de même, il reste souvent des inocula dans le lot qui peuvent recontaminer les graines.

✓ La détoxification/triage

Les graines endommagées, puis dans une moindre mesure les graines immatures, sont responsables de l'essentiel de la contamination des lots d'arachide (*Martin et al, 1999*). De ce fait, cette étape est très importante dans la chaîne de production de l'arachide puisqu'elle précède le conditionnement et suit la collecte des arachides. Ce triage même s'il n'est pas effectif et efficient, contribue à la préservation d'une bonne partie de la production en éliminant les mauvaises graines, et réduit ainsi la contamination à 95%. C'est pourquoi nous lui avons attribué un risque de contamination faible, comme le montre le tableau 3 ci-dessus.

✓ Le Stockage

L'arachide est un produit relativement hygroscopique pouvant se réhydrater pendant le stockage (*Martin et al, 1999*). Une reprise d'humidité suffisante conduit généralement au développement de moisissures du genre *Aspergillus* largement présente dans l'inoculum du stock d'arachides. En plus de cela, l'activité biologique est non négligeable surtout si le lieu n'est pas désinfecté avant stockage, on peut assister dès le quatrième jour à la production d'aflatoxine, si les graines ont été réinfectées.

Connaissant l'état de plusieurs magasins de stockage (secco) du pays : souvent dans de très mauvais état, le risque très élevé a été attribué au stockage dans le tableau 3 ci-dessus.

✓ Le transport

Les conteneurs (par exemple, wagons, camions) utilisés pour la collecte et le transport des arachides récoltées du champ jusqu'aux installations de séchage ; et aux installations d'entreposage après le séchage, devraient être propres, secs et exempts de moisissures visibles avant l'utilisation et à la réutilisation (*CAC/RCP, 2004*). Par ailleurs, il faut aussi éviter les fluctuations de température et les mesures qui pourraient provoquer une condensation à la surface des arachides, ce qui pourrait conduire à la formation d'humidité localisée et favoriser l'apparition de moisissures et d'aflatoxines (*CAC/RCP, 2004*). Telles sont les règles édictées dans le code d'usage international sur les principes d'hygiène alimentaire (*CAC/RCP 1-1969, Rév. 4-2003*), cependant elles ne sont pas respectées.

Au Sénégal, le transport des arachides est principalement fait par des camions qui ne sont pas conçus pour cette tâche, en plus de cela les convoyeurs ignorent les mesures de bonne pratique en transport de denrée sensible. En dépit de ça, nous avons attribué pour ce facteur un risque de contamination négligeable comme consigné dans le tableau 3 ci-dessus. Parce que de toutes les localités de provenance de l'arachide, seule la localité de Kolda peut avoir un temps de voyage vers le

lieu d'embarcation (Dakar) qui excède 24 h, à cause de sa situation géographique, notamment avec la traversée de la rive de Gambie qui peut prendre plusieurs jours, le temps qu'il faut souvent pour une re-contamination à l'aflatoxine. Ou sinon il faudra parcourir plus de 689 km en passant par la région de Tambacounda ce qui n'est pas sans conséquence aussi, si on tient compte des aléas d'un voyage.

I.7 Provenance/localité

Globalement, tous les échantillons d'arachide que l'ITA a reçu entre 2017 et 2019, viennent des localités suivantes : Diourbel, Kaolack, Kolda, Louga et Touba (TB). Une comparaison en ce qui concerne la contamination de l'arachide aux aflatoxines entre les différentes localités ne peut pas être faite à cause de la différence du nombre d'échantillon que chaque localité a pu présenter à l'ITA.



DEUXIEME PARTIE

II. Approche méthodologique

II.1 Objectifs

Ce travail vise à trouver des facteurs explicatifs au dépassement de la norme de référence du codex Alimentarius aux arachides contaminés par les aflatoxines.

Il s'agit plus spécifiquement de :

- Déterminer les facteurs favorables à l'émergence des aspergillus et à la production des aflatoxines dans les localités concernées.
- Décrire la contamination en aflatoxines des arachides en provenance des localités concernées durant ces trois dernières années (2017,2018 et 2019).
- Décrire le dépassement de la norme de référence en aflatoxine du codex Alimentarius.

II.2 Cadre de l'étude

Cette étude s'est déroulée dans le laboratoire de mycotoxines de l'ITA entre décembre 2019 et mai 2020. Cette institution publique privée se situe sur la route des pères maristes.

Le laboratoire de mycotoxines appartient à la division de contrôle qualité de l'ITA. Il a été créé en 1973, son installation et sa mise en service ont été effectuées par un expert britannique du Tropical Product Institute de Londres. Ce laboratoire est spécialisé dans l'analyse des aflatoxines (B1, B2, G1, G2) dans l'alimentation humaine ainsi que celle du bétail et de la volaille. Il dose également les histamines dans certaines espèces de poissons comme le thon.

Dans le cadre de la formation, le laboratoire a encadré plusieurs étudiants pour la préparation des mémoires et des thèses.

Le laboratoire de mycotoxines est subdivisé en quatre salles :

- Salle N°1 : c'est dans cette pièce où les échantillons sont préparés.
- Salle N°2 : elle est réservée uniquement à l'extraction et la CCM.
- Salle N°3 : cette autre salle est subdivisée en deux parties à savoir la salle 3A où se trouve la chaîne HPLC et fluorimètre et la salle 3B qui sert de bureaux au personnel.
- Salle N°4 : elle sert à la conservation des échantillons après analyses.

Les postes techniques du laboratoire sont au nombre de six :

- Le poste Myco-P1 : préparation des échantillons.
- Le poste Myco-P2 : préparation et contrôle des solutions étalons.
- Le poste Myco-P3 : dosage des aflatoxines par CCM.

- Le poste Myco-P4 : dosage des aflatoxines par HLPC.
- Le poste Myco-P5 : dosage des autres mycotoxines.
- Le poste Myco-P6 : dosage de l’histamine dans les produits halieutiques.

II.3 Type d’étude

Cette étude portant sur l’évaluation du dépassement de la norme de référence du codex des arachides contaminées par les aflatoxines, est de type transversal d’analyse secondaire, basée sur des rendus de résultat des trois dernières années (2017,2018 et 2019) de l’ITA.

II.4 Echantillonnage

L’échantillonnage se rapporte à celui de l’ITA, qui est décrit par le codex (codex stan 193-1995) en ces terme : « le plan d’échantillonnage nécessite un échantillon de laboratoire unique de 20 kg d’arachides décortiquées (27 kg d’arachides en coque) qui sera prélevé sur un lot (sous-lot) d’arachides et testé pour déterminer que la limite maximale de 15 microgrammes d’aflatoxines totales par kilogrammes ($\mu\text{g}/\text{kg}$) ne sera pas dépassée ».

II.5 Collecte des données

La collecte des données, s’est effectuée en utilisant la méthode des traceurs. Il s’agit d’une méthode qualitative, rétrospective de sélection d’informations à l’aide de documents d’archive, elle permet d’utiliser une approche rétrospective en reconstruisant les processus et les réseaux à l’aide de documents d’archives ou une approche en temps réel. Elle a l’avantage d’être combiné à d’autres méthodes pour analyser les données et d’éviter de décrire un processus à partir d’un modèle pré construit.

II.6 Analyse des données

L’analyse est réalisée à l’aide du logiciel R version 3.6.1. Elle est initialement descriptive sous forme de résumé de paramètres de distribution et de mesure de fréquence présentée sous forme de tableau descriptif. A la suite de cette étape descriptive des mesures d’association entre la variable principale pour cette étude (dépassement de la norme de référence du codex) et les variables explicatives (qualité du triage, conditions de stockage et de transport) ont été effectuées. Une recherche d’explication du dépassement de la norme de référence du codex par les variables susmentionnées a par ailleurs été effectuée par régression logistique.

II.6.1 Description opérationnelle des variables utilisées dans la régression

1. Variable dépendante

La norme de référence du codex est de 15µg/kg pour les aflatoxines totales (*CODEX STAN 193-1995*). Sur la base des résultats d'analyse de l'ITA et en prenant pour seuil la norme de référence du codex, une variable qualitative binaire avec pour modalités oui (pour le dépassement de la norme/CAC) et non (pour le non-dépassement de la norme/CAC) a été créée et considérée comme variable dépendante.

Tableau 5: scores et caractéristiques du dépassement de la norme de référence du codex

Score	Caractéristique du dépassement
$E \leq 15 \mu\text{g/kg}$	Non : demande juste un suivi/ ou amélioration
$E > 15 \mu\text{g/kg}$	Oui : des changements immédiats s'imposent

Avec E : échantillon

2. Variable explicative

Les variables explicatives sont aussi binaires et donc classées en deux modalités : soit bon, soit mauvais. Ce classement est fait par inspection visuelle grâce à la documentation scientifique.

Il s'agit entre autres des caractéristiques ci-dessous :

- Un tirage qui est exempt de poussières, de graine fendue et de moisissure, est classé comme "bon". Cependant dans le cas contraire, les échantillons présentant beaucoup d'impureté (poussières, brindille etc.) et de graine moisi, sont des échantillons mal triés, et donc classés comme "mauvais".
- Les conditions de stockage, sont des conditions qu'on constate lors des prélèvements d'échantillon et qui sont décrites comme suit : l'enceinte est bien close avec absence d'activité biologique visible à l'œil nu et dont la durée de stockage est comprise entre trois à six mois, si ces conditions sont présentes, alors le stockage est dit "bon", au cas échéant (une enceinte présentant des failles, des activités biologiques visible à l'œil nu et une durée de stockage qui dépasse les six mois), le stockage est dit "mauvais".
- Les bonnes conditions de transport sont décrites comme suit : la distance de parcours entre le lieu de production et d'embarcation doit être courte et les graines transportées doivent être bien triées, au cas contraire les conditions sont dites "mauvais".

III. Résultats

III.1 Analyse descriptive univariée

Cette étape est importante dans la mesure où elle permet de voir la mesure exacte de chaque variable et de prendre des décisions, comme la suppression d'une variable ou le repérage d'une variable particulière à travers les valeurs qu'elle prend. Autrement dit, elle permet de nettoyer les données pour éliminer toute source de biais.

- **Variables quantitatives**

Le tableau 6 renseigne sur la distribution des observations entre les variables quantitatives en fonction de quelques paramètres statistiques. Ainsi nous avons la moyenne, la médiane, la variance (racine carré de l'écart type), le minimum et le maximum.

Tableau 6 : tableau récapitulatif de la distribution des observations entre les variables quantitatives

Variable	Moyenne	Médiane	Variance	Min	Max
Stock déclaré (kg)	2752059.633	5e+05	17976637.311	1000	154492000
Nombre d'échantillon	13	11	10	1	37
Teneur en aflatoxine ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	72	71	52	1	163

Par exemple, on peut constater qu'on a au minimum 1 échantillon pour 1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de teneur en aflatoxine et au maximum 37 échantillons pour 163 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de teneur en aflatoxine.

- **Variables qualitatives**

Le tableau 7 renseigne sur la distribution des observations en fréquences absolues et relatives en fonction des variables qualitatives et des dépassements de norme de référence (codex et américaine).

Tableau 7 : résumé de la distribution en fréquences (absolues et relatives) des observations entre les variables qualitatives et la variable dépendante

Variable	Modalités	Fréquence absolue	Fréquence relative
		N	%
Triage	Bon	36	16,5
	Mauvais	182	83,5
Stockage	Bon	35	16,1
	Mauvais	182	83,9
Transport	Bon	202	92,7
	Mauvais	16	7,3
Dépassement de la norme de référence du codex	Oui	45	20,6
	Non	173	79,4
Dépassement de la norme de référence américaine	Oui	52	23,9
	Non	166	76,1

Le tableau 7 montre une distribution inégale entre les modalités (bon et mauvais). Ainsi pour toutes les variables confondues, la modalité "mauvais et non" est plus représentée que "oui et bon", sauf pour la variable transport où on a en fréquence relative 92,7 % des observations qui ont eu un bon transport contre 7,3 % qui ont eu un mauvais transport.

Par contre peu d'observations ont dépassé la norme de référence du codex et même celle américaine. Par exemple il y'a eu que 20,6 % contre 79,4 % observations qui ont eu à dépasser la norme du codex.

III.2 Analyse descriptives bivariées

Le tableau 8 montre la distribution des observations entre les modalités de la variable dépendante (dépassement de la norme de référence du codex) et celles des variables explicatives (qualité du triage, conditions de stockage et de transport) en fonction des localités.

Tableau 8 : récapitulatif de la distribution des observations entre les variables qualitatives (explicatives) et la variable dépendante selon les localités.

		Localité					Total
		Kaolack	Kolda	Diourbel	Louga	Touba	
Triage	Bon	9	7	1	3	16	36
	Mauvais	59	27	11	9	76	182
	Total	68	34	12	12	92	218
Stockage	Bon	8	7	1	3	16	35
	Mauvais	60	27	11	9	76	183
	Total	68	34	12	12	92	218
Transport	Bon	68	18	12	12	92	202
	Mauvais	0	16	0	0	0	16
	Total	68	34	12	12	92	218
Dépassement de la norme de référence du codex	Oui	9	10	2	5	19	45
	Non	59	24	10	7	73	173
	Total	68	34	12	12	92	218
Dépassement de la norme de référence américaine	Oui	10	11	3	6	22	52
	Non	58	23	9	6	70	166
	Total	68	34	12	12	92	218

Sur les 218 observations, les 182 observations ont eu un mauvais triage (toute localité confondue) contre 36 observations qui ont un bon triage, dont 68 observations de la localité de Kaolack et quel que soit leur modalité de triage (bon ou mauvais), se répartissent comme suit : 9 observations ont été bien triés contre 59 observations mal triés.

Selon la norme de référence du codex, sur 218 observations, il y'a eu 173 observations (toute localité confondue) qui ont respecté la norme contre 45 observations qui l'ont dépassé, dont 34 observations de la localité de Kolda (toute modalité confondue), se répartissent comme suit : 10 contre 24 observations ont dépassé la norme du codex.

Il en est de même pour les conditions de stockage et de transport ainsi que pour la norme américaine, avec une légère différence notée entre les localités.

Le tableau 9 suivant renseigne sur la distribution des observations entre la variable dépendante et les années (2017,2018 et 2019) puis entre celles-ci et les variables explicatives.

Tableau 9 : récapitulatif de la distribution des observations entre la variable dépendante et les années et entre celles-ci et les variables explicatives.

		Dépassement de niveau				Total
		Référence selon le		Selon la norme		
		codex		américaine		
		Oui	Non	Oui	Non	
Année	2017	5	49	5	49	54
	2018	20	63	23	60	83
	2019	20	61	24	57	81
	Total	45	173	52	166	218
Triage	Bon	36	0	36	0	36
	Mauvais	9	173	16	166	182
	Total	45	173	52	166	218
Stockage	Bon	35	0	35	0	35
	Mauvais	10	173	17	166	183
	Total	45	173	52	166	218
Transport	Bon	45	157	52	150	202
	Mauvais	0	16	0	16	16
	Total	45	173	52	166	218

Ainsi, 218 observations (toute norme confondue) se répartissent comme suit entre les années : 54 observations en 2017,83 observations en 2018 et 81 observations en 2019, dont 45 observations (toute année confondue) ont dépassé la norme du codex et se répartissent comme suit : 5 obs en 2017, 20 observations en 2018 et 20 observations en 2019. Et 173 observations (toute année confondue) n'ont pas dépassé la norme du codex et se répartissent comme suit : 49 observations en 2017, 63 observations en 2018 et 61 obs en 2019.

Par ailleurs, 36 observations (toute norme confondue) ont eu un bon triage contre 182 observations qui ont eu un mauvais triage, dont 45 observations quel que soit la modalité du triage ont eu a dépassé la norme du codex et se répartissent comme suit : 36 observations ont eu un bon triage et 9 observations ont eu un mauvais triage.

Par contre 173 observations (toute modalité confondue) n'ont pas dépassé la norme du codex : avec 173 observations qui ont eu un mauvais triage contre 0 observation pour la modalité "bon triage". Ceci est valable pour les conditions de stockage et de transport ainsi que pour la norme américaine avec de légère variation.

III.3 Mesure d'association et comparaison des variables qualitatives

Nous allons grâce à des tests longtemps utilisés pour leurs fiabilités, vérifier l'éventuel lien existant entre les variables explicatives et la variable dépendante.

▪ **Dépassement de la norme de référence du codex – (Triage ; Transport ; Stockage)**

Tous les effectifs théoriques de la contingence entre le dépassement de la norme de référence du codex et le triage sont supérieurs à 5. Il en est de même avec les conditions de stockage. Un test du chi-2 d'indépendance de variables, sans correction a été appliqué à ces deux situations pour mesurer l'association entre les variables.

Le tableau 9 bivarié (le Dépassement de la norme de référence du codex – conditions de transport), comporte un effectifs théorique faible (proche de 3) d'où l'utilisation du test exact de Fisher pour la mesure d'association. Les résultats sont consignés dans le tableau 10.

Tableau 10 : mesure d'association entre la variable dépendante et les variables explicatives

	Test de Chi-2	Test de Fischer
Observation	Effectif théorique > 5	Effectif théorique < 3
Variable explicative	Triage ; Stockage	Transport
Taux de significativité	5% (p-value < 2,2e-16 < 0,05)	5% (p-value = 0,04746 < 0,05)
Conclusion	La p-value est inférieur à 0,05, il existe donc un lien entre le dépassement et les variables triage et stockage.	La p-value est inférieur à 0,05, il existe donc un lien entre le dépassement et la variable transport.

Résultat :

- + Test de la liaison / Chi-2 sans correction : Le test est statistiquement significatif au seuil de 5% (p-value < 2,2e-16 < 0,05) => **Donc il y'a existence de liaison entre le dépassement de la norme du codex et le triage.**

- + Test de la liaison / Chi-2 sans correction : Le test est statistiquement significatif au seuil de 5% ($p\text{-value} < 2,2e-16 < 0,05$) => **Donc il y'a aussi existence de liaison entre le dépassement de la norme du codex et les conditions de stockage.**
- + Test de la liaison / Test exact de variables de Fisher : Le test est statistiquement significatif au seuil de 5% ($p\text{-value} = 0,04746 < 0,05$) => **Donc il existe une liaison entre le dépassement de la norme du codex et les conditions de transport.**

III.4 Analyse Explicative par régression logistique

La régression logistique consiste à expliquer une variable binaire (ici le dépassement de la norme de référence du codex), grâce aux valeurs d'une variable explicative (quantitative ou qualitative). Le principe ici, consiste à chercher un modèle mathématique permettant d'expliquer le dépassement de la norme connaissant les valeurs prises par les différentes variables explicatives (triage, condition de transport et stockage). Une première étape de régression logistique simple a permis d'obtenir les résultats consignés dans le tableau 11 ci-dessous.

Tableau 11 : récapitulatif de la série de régression logistique simple du dépassement de la norme de référence du codex et quelques variables explicatives

Variables Indépendantes	Modalités	Beta	p-value
		Référence	
	Modalités		
		Bon	
Triage	Mauvais	-22,52	0,990
		Bon	
Stockage	Mauvais	-16,3165	0,987
		Bon	
Transport	Mauvais	-16,3165	0,987

Ainsi, le tableau 11 montre des betas faibles et des p-value supérieurs à 0,25, cette dernière est une valeur référentielle sur laquelle on se base pour continuer vers une régression multiple.

IV. Discussion

Ce travail s'inscrit dans un contexte particulier de modélisation d'un phénomène spécial au Sénégal à savoir la contamination des arachides par les aflatoxines.

En règle, générale, un phénomène est expliqué par une multitude de facteurs (variables). Mais par des soucis de méthodologie, ces variables sont d'abord étudiées une à une (analyse univariée) puis deux à deux (analyse bivariée) et même des fois par groupe (analyse multivariée), pour voir d'abord un éventuel lien et comprendre les caractéristiques de chaque variable, avant d'essayer de traduire ce lien en une écriture mathématique, autrement dit une explication mathématique (trouver un modèle).

Lors de l'analyse univariée avec les variables quantitatives. Nous avons pu remarquer que la moyenne du nombre d'échantillons est de 13,07 avec un maximum de 37, des chiffres jugés petits pour une analyse portant sur trois ans. Cette remarque a été aussi rapportée par l'étude faite sur le « *plan d'action de lutte contre les aflatoxines* », menées par le PACA en partenariat avec l'Etat du Sénégal qui l'avait signalé en ces termes « les seules données d'analyses d'aflatoxines de l'Institut de Technologie Alimentaire (ITA) sont essentiellement sous la commande de certains industriels (fabricants de chocolats, de pâte d'arachides, d'aliments de bétail, ...) ». Ceci pourrait en partie expliquer la remarque que nous venons de faire, mais la principale cause dans cette étude est que plusieurs échantillons ont été exclus de l'étude par faute de déclarer leur stock. Il faut noter que sans ce dernier, il serait difficile d'apprécier la teneur du lot, alors qu'une teneur doit être rattachée à une production comme l'indique son unité ($\mu\text{g}/\text{kg}$), autrement dit, une simple teneur n'est pas suffisante pour une analyse pertinente.

Par contre on a pu repérer, des valeurs assez conséquentes pour le stock déclaré et la teneur en aflatoxines qui ont respectivement un maximum de 154 492 000 kg et 163 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Ces valeurs élevées sont dues à un fort rendement noté ces dernières années pour le stock déclaré et à une exposition des arachides aux aflatoxines qui est aussi assez élevée et permanent. Pour cette dernière, la cause est surtout liée aux conditions climatiques du pays qui sont favorables à l'émergence et à la production des aflatoxines comme attesté par l'étude de *DIEME (2017)*, sans oublier les facteurs tels que le stockage, le transport et le triage qui y joueraient aussi un rôle et dont le mécanisme est largement détaillé dans la première partie.

Pour les variables qualitatives, nous avons remarqué une faible représentation de la modalité "bon", avec 35 contre 183 obs (toute localité confondue) qui ont été stockées dans de bonne condition. Cela est principalement dû du fait que mis à part l'exposition, la contamination de l'arachide a surtout lieu lors du stockage. Ces propos sont les mêmes que rapporte la *fiche sanitaire sur les coproduits : Aflatoxine BIM1 publié en octobre 2011*. À cela, s'ajoute l'état délabré de plusieurs magasins de stockage souvent vétuste.

Pour le triage, la faible représentation de la modalité "bon" est selon l'ITA causée par un triage inefficent dès fois même absents : trier des tonnes à mains nues n'est pas chose aisée, alors que cette pratique est toujours employée par manque de moyens par certains ruraux, ainsi donc il reste souvent des inocula d'*A flavus* dans les lots. En ceci concerne les exportateurs, les moyens sont là, mais souvent c'est la précipitation et l'envi d'importer en premier qui l'emporte plus sur le souci d'avoir un produit d'une bonne qualité sanitaire. À cet effet, des trieuses magnétiques ont été inventées, mais qui rencontrent à leur tour des limites dans le fonctionnement : ces machines trient en fonction de la couleur, alors qu'il arrive qu'une graine soit moisie de l'intérieur sans que cela n'apparaisse à l'extérieur (changement de couleur par rapport à la couleur normale).

Par contre on a noté une différence avec le transport où la modalité "bon" est plus représentée que la modalité "mauvais", c'est soit 92,7 % contre 7,3 % des observations qui ont été transportées avec un risque de contamination négligeable. Cela peut s'expliquer par le fait que malgré que le code d'usage international établi sur les principes généraux d'hygiène alimentaire soit négligé (pas respecté), le temps de voyage si l'on considère uniquement la voie terrestre n'excède pas 24 h, sauf pour la localité de Kolda qui est liée à sa position géographique par rapport à la localité d'embarcation (Dakar).

Dans l'analyse bivariée nous avons pu mesurer l'association entre les variables explicatives et la variable dépendante, et l'a vérifié par des tests statistiques fiables. Il ressort de cette mesure que chaque variable explicative prise singulièrement est liée au dépassement de la norme de référence du codex Alimentarius. Les causes sont nombreuses, mais les plus importantes pour cette étude ont été détaillées ci-dessus telles que la qualité du triage, les conditions de stockage et de transport, comme l'avait déjà signalé l'ITA en guise de ces nombreuses années d'expérience en aflatoxine.

L'analyse régressive simple nous a conduit à des estimations β trop faible et p-values qui dépassent la limite de 0,25. La faible estimation des β serait liée à un nombre d'échantillons petit comme rapporté ci-dessus. Il faut noter qu'avec la régression logistique simple, les estimateurs comme le maximum de vraisemblance se base sur la probabilité de l'observation de l'échantillon la plus forte, alors que celle-ci n'est que de 37 dans cette étude.

Les p-values sont valeurs seuil (0,25) à partir de laquelle on se base pour se prononcer sur la différence observée dans une comparaison (significative ou pas). Cependant, ces dernières sont toutes au-dessus de 0,25, qui est la limite approuvée pour passer à la régression multiple qui est une généralisation de la régression logistique simple. Et donc c'est lors de cette dernière étape qu'on parvient à établir une formule mathématique (autrement dit trouver un modèle explicite du phénomène étudié) dans des cas d'études comme la nôtre. Cependant ceci n'a pas pu être fait par faute de bêta trop faible et de p-value au-dessus de la limite de 0,25. Pour ce dernier il serait dû, du fait que l'attribution des modalités à nos variables explicatives a été faite par inspection visuelle comme dit tantôt.

Dans cette étude, la norme de 20 µg/kg appliquée par la Chine et l'Amérique a été utilisée pour montrer qu'elle est plus tolérante que celle du codex (15 µg/kg). Ainsi donc le coût de l'action pour sa mise en place en tant que norme de référence à l'exportation, coûterait moins cher et serait plus à la portée des pays comme le Sénégal, en même temps elle permettrait au Sénégal de rejoindre le Nigeria aujourd'hui favori au marché américain des exportations arachidières. Mais pour des raisons d'impact sanitaire, il serait mieux voire souhaitable d'avoir des teneurs les plus bas possible afin d'en faire des normes de commerce et par ailleurs assurer une bonne qualité sanitaire de la denrée auprès des consommateurs locaux.

Le marché chinois reste celui qui est le plus majoritairement ouvert aux arachides du Sénégal grâce à des accords politiques, alors que le challenge aurait pu être d'exporter plus de dérivés de produit arachidier comme l'huile ou des tourteaux, afin d'apporter plus de valeur ajoutée que ne l'apporte déjà la simple exportation des graines. Pour ce faire, il faudrait gagner plus de marchés avec des seuils plus raisonnables vis-à-vis du commerce international et aux normes sanitaires.

Conclusion

Cette étude nous a permis d'évaluer le dépassement de la norme de référence du codex, en fonction de la qualité du triage, des conditions de stockage et de transport. Cette évaluation nous a conduit à l'établissement d'un lien entre le dépassement de la norme de référence du codex et les variables susmentionnées, autrement dit ce dépassement pourrait être expliqué par ces variables. Mais ce lien établi n'a pas pu être traduit en explication mathématique (modèle) souhaité, par faute des estimations β trop faible et des p-values trop élevées. Par contre ce résultat laisse croire qu'on peut avoir un modèle prédictif du dépassement de la norme du codex, si les données sont conséquentes et ainsi apporter une aide sur la gestion des arachides en matière d'aflatoxines au Sénégal.

Cette étude nous a par ailleurs aussi permis d'acquérir beaucoup de notions de bases sur les mathématiques appliquées précisément en modélisation, elle nous a aussi permis d'asseoir nos bases en toxicologies réglementaires.

En perspective, nous suggérons le développement de modèle à chaque étape de la chaîne de production (du champ au produit fini), afin de fournir des données fiables qui serviront de banque de données en matière de modélisation de l'exposition des arachides aux aflatoxines. Parce que jusque-là, les seules données disponibles sont l'œuvre des commandes de quelques privés dont les résultats sont souvent inaccessibles au publique, ou de quelques recherches dont le but est surtout orienté sur des questions d'ordre économiques et/ou agronomiques.

Reference bibliographique :

- Afssa. 2009.** « Évaluation des risques liés à la présence de mycotoxines dans les chaînes alimentaires humaine et animale ». *Rapport final: 1-308.*
- ANSES. 2012.** « *Aspergillus flavus* et autres moisissures productrices d'aflatoxines ». *Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments 3: 1.*
- BENSAKHRIA, Ayoub. 2018a.** « Mycotoxines » *Analytical Toxicology* ». *Analytical Toxicology.* <https://www.analyticaltoxicology.com/mycotoxines/> (6 juin 2020).
- B. 2018.** « Mycotoxines » *Analytical Toxicology* ». *Analytical Toxicology.* <https://www.analyticaltoxicology.com/mycotoxines/> (12 juin 2020).
- Brochard, G., et C. Le Bacle. 2009.** « Mycotoxines en milieu de travail ». *Origine et Propriétés Toxiques des Principales Mycotoxines. INRS, Documents pour le Médecin Du Travail 119.*
- Bureau international du travail. « Chapitre 33 - La toxicologie ».** <http://www.ilocis.org/fr/documents/ilo033.htm> (3 décembre 2020a).
- CAC/RCP. 2004.** « code d'usages pour la prévention et la réduction de la contamination des arachides par les aflatoxines ».
- Ce bref résumé se fonde sur l'évaluation récente actualisée des aflatoxines réalisées par le Comité mixte FAO/OMS d'experts des additifs alimentaires. 2018.** « *Les aflatoxines* ». *Février 2018 6: 1.*
- CODEX STAN 193-1995.** « Norme générale pour les contaminants et les toxines présents dans les produits de consommation humaine et animale codex stan 193-1995 adoptée en 1995. révision : 1997, 2006, 2008, 2009. Amendement : 2010, 2012, 2013, 2014, 2015. »
- Dieme, Eliasse et al. 2017.** « Contamination des céréales par l'aflatoxine en Afrique : revue des méthodes de lutte existantes ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 10(5): 2285.
- ISRA, ITA, CIRAD, 2005 :** « *Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal* ». : 524.
- L.Bouton J. Caudrillier.** « Fiche sanitaire coproduit : Aflatoxines B1/M1 ». 2011 7.
- Le monde diplomatique. 1965.** « *La protection de l'arachide, support de l'économie sénégalaise* ». *Le Monde diplomatique.* <https://www.monde-diplomatique.fr/1965/06/A/26632> (3 décembre 2020).
- Martin, José, A. Ba, Philippe Dimanche, et Robert Schilling. 1999.** « *Comment lutter contre la contamination de l'arachide par les aflatoxines? : expériences conduites au Sénégal* ». *Agriculture et Développement.* <https://agritrop.cirad.fr/476184/> (3 décembre 2020).
- Ndir, Babacar.** « *Directeur Général Adjoint* ». : 105.
- Noba, Kandioura et al. 2014.** « *L'arachide au Sénégal : état des lieux, contraintes et perspectives pour la relance de la filière* ». *OCL 21(2): D205.*
- PACA/UA-BIRA :** « *Plan d'actions de lutte contre les aflatoxines au Sénégal* ». 2016.
- Qian, Guoqing et al. 2013.** « *Physiologically Based Toxicokinetics of Serum Aflatoxin B1-Lysine Adduct in F344 Rats* ». *Toxicology* 303: 147-51.
- Sene, Seckène et al. 2016.** « *comité de lecture et de validation (clv)* ». : 15.
- Wikistat.fr.** <http://wikistat.fr/> (7 janvier 2021).

V. Annexe : matrice

Pour pouvoir analyser nos données avec le logiciel R, nous avons conçu une matrice, avec les classeurs des années 2017, 2018 et 2019 qui contiennent des rapports d'analyse, qui renseignent sur :

- La provenance (principalement la zone du bassin arachidier)
- La teneur en aflatoxine totale (AFT) $\mu\text{g}/\text{kg}$
- La quantité du stock déclaré exprimée en tonne (t) et convertie en kg.

Pour faciliter l'analyse de notre matrice par le logiciel R, nous avons codé nos variables explicatives {Qualité du triage (Q-triage), Condition de stockage (C-stockage) et Condition de transport (C-transport)}, comme suit :

- ✓ 1 = bon
- ✓ 0 = mauvais

Tableau 12 : matrice R

NOM	stock_dec- kg	Afla- $\mu\text{g}/\text{kg}$	Q-triage	C-stockage	C-transport	Nbr-Ech	Année
DL	108000	12,3	0	0	1	1	2018
DL	18000	<0,1	1	1	1	2	2018
DL	18000	4,3	0	0	1	3	2018
KL	1000000	4,9	0	0	1	1	2018
KL	2500000	3,8	0	0	1	2	2018
KL	30000	10	0	0	1	3	2018
KL	33000	<0,1	1	1	1	4	2018
KL	30000	51,7	0	0	1	5	2018
KL	154492000	5	0	0	1	6	2018
KL	154492000	14,3	0	0	1	7	2018
KL	154492000	3,2	0	0	1	8	2018
KL	16000	118,8	0	0	1	9	2018
KL	300000	5,1	0	0	1	10	2018
KL	21000	1,6	0	0	1	11	2018
KL	96000	99,1	0	0	1	12	2018
KL	300000	149,1	0	0	1	13	2018
KL	2000000	152,1	0	0	1	14	2018
KL	2000000	21,6	0	0	1	15	2018

KL	47000	<0,1	1	1	1	16	2018
KL	118000	150,8	0	0	1	17	2018
KD	1200000	12,5	0	0	0	1	2018
KD	1000000	1,7	0	0	1	2	2018
KD	1000000	3,6	0	0	1	3	2018
KD	1000000	1,1	0	0	1	4	2018
KD	1400000	30	0	0	0	5	2018
KD	1000000	0,9	0	0	1	6	2018
KD	580000	50,9	0	0	0	7	2018
KD	580000	1	0	0	1	8	2018
KD	700000	176	0	0	0	9	2018
KD	700000	27,1	0	0	0	10	2018
KD	1040000	164	0	0	0	11	2018
KD	1400000	125	0	0	0	12	2018
KD	1040000	53,7	0	0	0	13	2018
KD	1040000	21,5	0	0	0	14	2018
KD	700000	21,3	0	0	0	15	2018
KD	720000	<0,1	1	1	1	16	2018
KD	1000000	5,7	0	0	1	17	2018
KD	700000	<0,1	1	1	1	18	2018
KD	1046000	4,6	0	0	1	19	2018
KD	1400000	3,5	0	0	1	20	2018
KD	300000	<0,1	1	1	1	21	2018
KD	400000	19,4	0	0	0	22	2018
KD	1400000	3,3	0	0	1	23	2018
LG	18000	4,5	0	0	1	1	2018
LG	18000	<0,1	1	1	1	2	2018
LG	18000	<3,5	0	0	1	3	2018
TB	1500000	151	0	0	1	1	2018
TB	20000	<0,1	1	1	1	2	2018
TB	600000	1,7	0	0	1	3	2018
TB	180000	40,8	0	0	1	4	2018

TB	70000	47,8	0	0	1	5	2018
TB	60000	35,1	0	0	1	6	2018
TB	20000	<0,1	1	1	1	7	2018
TB	40000	<0,1	1	1	1	8	2018
TB	1500000	151	0	0	1	9	2018
TB	40000	<0,1	1	1	1	10	2018
TB	30000	<0,1	1	1	1	11	2018
TB	40000	33,2	0	0	1	12	2018
TB	1500000	11,2	0	0	1	13	2018
TB	70000	69,2	0	0	1	14	2018
TB	350000	172	0	0	1	15	2018
TB	300000	37,8	0	0	1	16	2018
TB	600000	314	0	0	1	17	2018
TB	3000000	170,8	0	0	1	18	2018
TB	1500000	7,3	0	0	1	19	2018
TB	30000	3,8	0	0	1	20	2018
TB	3000000	5,4	0	0	1	21	2018
TB	500000	8,7	0	0	1	22	2018
TB	400000	7,9	0	0	1	23	2018
TB	100000	26,4	0	0	1	24	2018
TB	600000	5,7	0	0	1	25	2018
TB	300000	3,1	0	0	1	26	2018
TB	1000000	4,2	0	0	1	27	2018
TB	1000000	0,3	1	1	1	28	2018
TB	1500000	4,4	0	0	1	29	2018
TB	40000	<0,1	1	1	1	30	2018
TB	20000	<0,1	1	1	1	31	2018
TB	1500000	7,3	0	0	1	32	2018
TB	250000	178,6	0	0	1	33	2018
TB	1000000	10	0	0	1	34	2018
TB	22000	0,1	1	1	1	35	2018
TB	1000000	26,4	0	0	1	36	2018

TB	1000000	69,1	0	0	1	37	2018
KL	110000	2,5	0	0	1	1	2017
KL	581000	35,3	0	0	1	2	2017
KL	180000	43,9	0	0	1	3	2017
KL	570000	103	0	0	1	4	2017
KL	300000	24,4	0	0	1	5	2017
KL	200000	49,7	0	0	1	6	2017
KL	1000000	16,2	0	0	1	7	2017
KL	500000	122	0	0	1	8	2017
KL	112000	124,8	0	0	1	9	2017
KL	400000	124,1	0	0	1	10	2017
KL	160000	117,2	0	0	1	11	2017
KL	1000000	69,6	0	0	1	12	2017
KL	190000	103	0	0	1	13	2017
KL	1500000	2,7	0	0	1	14	2017
KL	320000	3,2	0	0	1	15	2017
KL	280000	12	0	0	1	16	2017
KL	200000	3,4	0	0	1	17	2017
KL	310000	111,3	0	0	1	18	2017
KL	500000	135	0	0	1	19	2017
KL	1300000	120	0	0	1	20	2017
KL	200000	127	0	0	1	21	2017
KL	600000	16,7	0	0	1	22	2017
KL	700000	153,6	0	0	1	23	2017
KL	320000	14,9	0	0	1	24	2017
KL	1500000	28,8	0	0	1	25	2017
KL	185000	45	0	0	1	26	2017
KL	600000	17,8	0	0	1	27	2017
KL	320000	8,3	0	0	1	28	2017
KL	500000	57,7	0	0	1	29	2017
KL	190000	<0,5	1	1	1	30	2017
KL	640000	<0,1	1	1	1	31	2017

KL	500000	37	0	0	1	32	2017
KD	500000	13,1	0	0	0	1	2017
KD	600000	65,7	0	0	0	2	2017
KD	600000	<0,8	1	1	1	3	2017
TB	1000000	3	0	0	1	1	2017
TB	600000	15,9	0	0	1	2	2017
TB	1000	<0,1	1	1	1	3	2017
TB	800000	6,4	0	0	1	4	2017
TB	19000	4,4	0	0	1	5	2017
TB	500000	3,4	0	0	1	6	2017
TB	300000	32,3	0	0	1	7	2017
TB	19000	10,8	0	0	1	8	2017
TB	1300000	85,8	0	0	1	9	2017
TB	400000	137,9	0	0	1	10	2017
TB	700000	44,2	0	0	1	11	2017
TB	217000	16,2	0	0	1	12	2017
TB	1000000	56,8	0	0	1	13	2017
TB	425000	149	0	0	1	14	2017
TB	85000	13,3	0	0	1	15	2017
TB	115000	<0,1	1	1	1	16	2017
TB	25000	6,9	0	0	1	17	2017
TB	1000000	16,6	0	0	1	18	2017
TB	1000000	10,5	0	0	1	19	2017
DL	18000	23,4	0	0	1	1	2019
DL	18000	4,2	0	0	1	2	2019
DL	18000	47,1	0	0	1	3	2019
DL	18000	7,3	0	0	1	4	2019
DL	18000	32,8	0	0	1	5	2019
DL	18000	37,4	0	0	1	6	2019
DL	18000	1,3	0	0	1	7	2019
DL	18000	1,9	0	0	1	8	2019
DL	18000	6	0	0	1	9	2019

KL	2000000	38,9	0	0	1	1	2019
KL	1000000	<0,1	1	1	1	2	2019
KL	60000	0,9	1	0	1	3	2019
KL	500000	63,9	0	0	1	4	2019
KL	500000	41,9	0	0	1	5	2019
KL	1000000	114	0	0	1	6	2019
KL	1000000	17,3	0	0	1	7	2019
KL	2000000	10,4	0	0	1	8	2019
KL	500000	37,5	0	0	1	9	2019
KL	40000	3,9	0	0	1	10	2019
KL	1500000	8	0	0	1	11	2019
KL	2000000	3,7	0	0	1	12	2019
KL	2000000	<0,1	1	1	1	13	2019
KL	1000000	15,9	0	0	1	14	2019
KL	1000000	293	0	0	1	15	2019
KL	2000000	<0,1	1	1	1	16	2019
KL	2000000	40,1	0	0	1	17	2019
KL	2000000	19	0	0	1	18	2019
KL	25000	0,5	1	1	1	19	2019
KD	900000	130	0	0	0	1	2019
KD	1000000	4,3	0	0	1	2	2019
KD	700000	3,2	0	0	1	3	2019
KD	540000	81,7	0	0	0	4	2019
KD	540000	27,9	0	0	0	5	2019
KD	500000	<0,1	1	1	1	6	2019
KD	1200000	<0,1	1	1	1	7	2019
KD	1000000	0,7	1	1	1	8	2019
LG	18000	33,9	0	0	1	1	2019
LG	18000	2,1	0	0	1	2	2019
LG	18000	1,1	0	0	1	3	2019
LG	18000	2,2	0	0	1	4	2019
LG	18000	1,8	0	0	1	5	2019

LG	18000	19,6	0	0	1	6	2019
LG	18000	<0,1	1	1	1	7	2019
LG	20000	9,6	0	0	1	8	2019
LG	18000	<0,1	1	1	1	9	2019
TB	500000	14,5	0	0	1	1	2019
TB	200000	21	0	0	1	2	2019
TB	1500000	<0,1	1	1	1	3	2019
TB	110000	38,1	0	0	1	4	2019
TB	500000	18	0	0	1	5	2019
TB	18000	<0,1	1	1	1	6	2019
TB	30000	27,7	0	0	1	7	2019
TB	1000000	0,4	1	1	1	8	2019
TB	1000000	2,5	0	0	1	9	2019
TB	1000000	1,4	0	0	1	10	2019
TB	18000	13,8	0	0	1	11	2019
TB	19000	27,7	0	0	1	12	2019
TB	19000	1,3	0	0	1	13	2019
TB	19000	1,1	0	0	1	14	2019
TB	18000	109,6	0	0	1	15	2019
TB	100000	20,7	0	0	1	16	2019
TB	250000	49,1	0	0	1	17	2019
TB	800000	18,4	0	0	1	18	2019
TB	1000000	9,6	0	0	1	19	2019
TB	500000	123	0	0	1	20	2019
TB	700000	<0,1	1	1	1	21	2019
TB	500000	19,7	0	0	1	22	2019
TB	1500000	2,8	0	0	1	23	2019
TB	2000000	18,1	0	0	1	24	2019
TB	1000000	<0,1	1	1	1	25	2019
TB	3000000	38,1	0	0	1	26	2019
TB	300000	3,3	0	0	1	27	2019
TB	1000000	2,9	0	0	1	28	2019

TB	1000000	1,6	0	0	1	29	2019
TB	900000	6,3	0	0	1	30	2019
TB	850000	5,1	0	0	1	31	2019
TB	1000000	4	0	0	1	32	2019
TB	1000000	249,1	0	0	1	33	2019
TB	2000000	1,2	0	0	1	34	2019
TB	200000	8,1	0	0	1	35	2019
TB	200000	30,6	0	0	1	36	2019