



HAL
open science

Nourrir le monde de demain : avantages et risques de l'entomophagie

Samuel Bonneau

► **To cite this version:**

Samuel Bonneau. Nourrir le monde de demain : avantages et risques de l'entomophagie. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-03125122

HAL Id: dumas-03125122

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03125122v1>

Submitted on 29 Jan 2021

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

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



UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE

UFR DE PHARMACIE

THÈSE D'EXERCICE

pour le

DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

Nourrir le monde de demain : avantages et risques de l'entomophagie

Présentée et soutenue publiquement

le 23 octobre 2020

par

Samuel Bonneau

Jury :

Président	Éric Beyssac	Professeur, <i>UFR Pharmacie de Clermont-Ferrand</i>
Membre	Sylvie Miquel	Maître de conférences, <i>UFR Pharmacie de Clermont-Ferrand</i>
Membre	Nicolas Franchini	Docteur en pharmacie <i>Responsable de production biologique chez Boehringer ingelheim</i>

Remerciements

A Monsieur le Professeur Éric Beyssac - Vous me faites l'honneur de présider le jury de ma thèse. Je vous remercie de l'intérêt que vous portez à ce travail. Par votre enseignement, par votre investissement à l'AEPIIC et par votre humour, vous avez su nourrir mon envie d'apprendre et mon intérêt pour la pharmacie.

A Madame le Docteur Sylvie Miquel - Vous m'avez permis d'apprendre de nombreuses techniques et d'approcher toutes les étapes de la recherche fondamentale. J'ai apprécié vos conseils et votre attention lors de mon stage dans votre laboratoire.

A Monsieur le Docteur Nicolas Franchini - merci d'avoir accepté de diriger cette thèse, je suis ravi de soumettre mon travail à ton œil critique et de bénéficier de tes conseils avisés.

A ma famille, pour avoir fait en sorte que je puisse réaliser mes études dans les meilleures conditions. Merci de m'avoir toujours soutenu dans mes projets. Maman, Papa, Pierre, je suis fier d'avoir accompli ce parcours grâce à vous. Vous m'avez donné la curiosité et la confiance dans les moments de doute. Merci de m'avoir soutenu dans la réalisation de ce travail.

Aux ami·e·s du Lycée (ADZ), du MRJC et de la fac – Grâce à vous, mes années étudiantes, partagées entre le travail, la vie associative et les moments de franches rigolades, resteront gravées dans ma mémoire.

Table des matières

Remerciements	1
Table des figures	7
Table des tableaux	8
Table des annexes.....	9
Abréviation.....	10
Préambule.....	11
Introduction	13
I. Histoire de l'entomophagie.....	14
1. Entomophagie et religion	14
2. Entomophagie dans les temps anciens	14
3. Entomophagie moderne.....	15
II. Où mange-t-on des insectes ?.....	16
1. Afrique.....	18
2. Asie	19
3. Amérique latine et Amérique du sud	19
4. Occident	20
III. Les insectes les plus consommés	20
1. Grands groupes d'insectes comestibles	20
a. Coléoptères (scarabées) :.....	22
i. Le genre Rynchophorus.....	22
ii. La famille Tenebrionidae.....	22
b. Lépidoptères (papillons) :.....	23
i. Chenille mopane	23
c. Hyménoptères (guêpes, abeilles et fourmis)	24
d. Orthoptères (sauterelles, criquet et grillons).....	24
i. La chapulines (Sphenarium spp.)	25
ii. Acheta domesticus	26
e. Homoptères (cigales, cicadelles et cochenilles)	26
f. Hétéroptères (punaises).....	26

g.	Isoptères (termites).....	27
2.	Les produits issus d'insectes.....	27
a.	Cochenille.....	28
b.	Ver à soie.....	28
c.	Abeille	29
d.	Lerp	29
e.	Huiles comestibles de punaises	30
IV.	Récolte et élevage	31
V.	Environnement et social.....	32
1.	<i>Bioconversion des déchets organiques</i>	32
2.	Émission de gaz à effet de serre et d'ammoniac	32
3.	Surface d'élevage nécessaire.....	34
4.	Bien-être animal	35
5.	Revenu.....	35
VI.	Législation.....	37
	Avantages.....	39
I.	Composition nutritionnelle	40
1.	Énergie alimentaire	40
2.	Protéines et Acides aminés	41
3.	Matières grasses.....	44
4.	Minéraux	46
5.	Vitamines.....	48
6.	Fibres	50
II.	Autres avantages indirects pour la santé.....	50
1.	Taux de conversion en protéine	50
2.	Sécurité alimentaire	51
3.	Faible consommation en eau	53
	Risques.....	55
I.	Risques allergiques	56
1.	Allergènes responsables d'une sensibilisation spécifique.....	57
a.	Additif alimentaire E120	57

b.	Pollen	57
2.	Allergènes croisés et réactivités croisées	57
a.	Chitine	57
b.	Tropomyosine	59
c.	Arginine kinase	60
d.	Autres allergènes	62
II.	Risque microbiologique.....	62
1.	Bactéries	63
a.	Approche globale de la contamination bactérienne	64
i.	Aérobies mésophiles totaux.....	65
ii.	Entérobactéries.....	66
iii.	Bactéries sporulantes.....	66
b.	Le genre Cronobacter.....	67
c.	Le genre Bacillus.....	67
d.	Le genre Clostridium	68
e.	Le genre Pseudomonas	68
f.	Le genre Staphylococcus	68
g.	Le genre Vibrio	69
h.	Le genre Campylobacter	69
i.	Le genre Salmonella	69
j.	Le genre Listeria	70
k.	Gènes de résistance aux antibiotiques	70
2.	Parasites	72
a.	Le genre Cryptosporidium.....	73
b.	Le genre Isospora	74
c.	Le genre Balantidium	74
d.	Le genre Entamoeba	75
e.	Les cestodes	75
f.	Le genre Physaloptera.....	75
g.	Les spiruroïdes	76
h.	Trypanosoma cruzi.....	76
3.	Moisissures, levures et mycotoxines.....	77

4.	Virus.....	79
a.	Les arbovirus	80
b.	Les virus spécifiques des arthropodes	80
5.	Prion	81
6.	Adaptation de nouveaux pathogènes à l'humain.....	81
III.	Toxicité intrinsèque	82
1.	Substances chimiques	82
a.	Venins.....	82
b.	Antinutriments	83
i.	Thiaminase	83
ii.	Acide phytique	84
c.	Autres substances chimiques.....	84
i.	Cyanure d'hydrogène.....	84
ii.	Hétéroside cardiotonique	85
iii.	Alcanes et des aldéhydes des famille Tessératomides et Pentatomidae.....	85
iv.	Stéroïdes métaboliques.....	86
v.	Cantharidine.....	86
2.	Agents physiques.....	86
IV.	Contamination extrinsèque.....	87
1.	Métaux lourds	87
2.	Pesticides ou polluants organiques	88
3.	Médicaments vétérinaires.....	89
	Exemple du Ténébrion	90
	Comment garantir un élevage, une production et une consommation sûr et de qualité en Europe ?.....	90
I.	Méthode HACCP	91
II.	Elevage	93
1.	Conditions d'élevage	94
2.	Risques allergiques	95
3.	Risques microbiologiques	96
4.	Contaminations extrinsèques.....	98
III.	Transformation, conservation et stockage	98

1.	Risques allergiques	100
2.	Traitements et risques microbiologiques	100
a.	Fermentation	101
b.	Lyophilisation	102
c.	Eviscération et traitement thermique.....	102
d.	Stérilisation	104
e.	Marinade	104
IV.	Consommation	105
1.	Risque allergique	106
2.	Risques microbiologiques	106
	Conclusion.....	108
	Bibliographie	112
	Annexes.....	132
	Serment de Galien	144

Table des figures

Figure 1 : Graphique montrant le nombre de publication par année sur Pubmed avec les mots clés Insect, Edible et Food	16
Figure 2 : Echelle en nuance de vert du nombre d'espèce d'insectes comestibles recensé par pays d'après le Center for Geo Information de l'université de Wageningen (1).....	17
Figure 3 Pluviométrie mensuelle (en haut) et occurrence mensuelle des repas de poisson, de chenilles et de gibier sur une période de 15 mois consécutifs dans la région du lac Tumba, République démocratique du Congo (1).	18
Figure 4 : Les principaux insectes comestibles situés dans l'arbre taxonomique des arthropodes (1,24–28).....	21
Figure 5 : Comparaison des espèces d'arthropodes comestibles autres que les crustacés (1).	21
Figure 6 : Photo d'un <i>Rhynchophorus ferrugineus</i> MHNT à gauche et photo d'un plat à base de larve de charançon du palmier à droite – Sources : Wikipédia et IRD.....	22
Figure 7 : Photo d'un <i>Tenebrio molitor</i> à gauche et des larves de <i>Tenebrio molitor</i> grillées et sous forme de poudre à droite -Source : Wikipédia et web-agri	23
Figure 8 : Photo de chenilles mopane cuisinées – Source : Globalvoice.....	24
Figure 9 : Photo de chapulines grillé sur un marché mexicain – Source : INRA.....	25
Figure 10 : Photo de grillons grillés (<i>Acheta domestica</i>) prêt à manger à gauche et paquet de poudre de grillon (<i>Acheta domestica</i>) à droite – Source : Next-food.....	26
Figure 11 : Photo du colorant extrait des cochenilles à gauche et photo d'un groupe de cochenille <i>Dactylopius coccus</i> à droite – Sources : Wikipedia et Agrimaroc	28
Figure 12 : Chrysalide de ver à soie <i>Bombyx mori</i> prêt à être consommé - Source : Wikipedia	29
Figure 13 : Lerp de <i>Glycaspis brimblecombei</i> - source : Nathistoc	30
Figure 14 : Photo de grillons élevés pour la consommation humaine – source : Micronutris.....	32
Figure 15 : production de GES par kg de gain de masse pour trois espèces d'insectes, les porcs à faible production de GES (Porc faible GES), les porcs à haute production de GES (Porc haute GES) et les bœufs (63).	34
Figure 16 : production d'ammoniac par kg de gain de masse pour trois espèces d'insectes, les porcs (63).	34
Figure 17 : Graphique montrant l'espace en hectare nécessaire pour produire une quantité similaire de protéine en fonction de l'animal (Ver de farine, poulet, porc ou bœuf) (65).	35
Figure 18 : Une femme récoltant des sauterelles au Laos – source : Harmke Klunder	36
Figure 19 : Vente de chenilles sur un marché à Kinshasa en République démocratique du Congo – source : FAO	37
Figure 20 : Teneur en protéines de classes ou d'espèces d'insectes par rapport au bœuf (75).....	43
Figure 21 : Composition en acides aminés en g/Kg de <i>Pachymerus nucleorum</i> et de larve de <i>Tenebrio molitor</i> ainsi que les besoins nutritionnelles moyen pour un adulte (9).	44
Figure 22 : Conversion en aliment du criquet, des volailles, du porc et du bœuf (1).	51

Figure 23 : Modèle moléculaire en double hélice à droite, construit par homologie pour la tropomyosine du ver à soie, <i>Bombyx mori</i> (11).	59
Figure 24 : Alignement des séquences de la tropomyosine du ver à soie <i>Bombyx mori</i> (<i>Bombyx</i>) avec les tropomyosines de la blatte européenne <i>Blattella germanica</i> (<i>Blag7</i>), de la crevette tigrée <i>Penæus monodon</i> (<i>Penm1</i>) et de l'acarien <i>Dermatophagoides pteronyssinus</i> (<i>Derp10</i>). Les acides aminés identiques sont en lettres blanches sur fond noir et les acides aminés homologues en lettres noires sur fond gris (11).	60
Figure 25 : Gauche : Modèle tridimensionnel construit par homologie pour l'arginine kinase du ver à soie, <i>Bombyx mori</i> . L'ATP, qui intervient comme donneur de phosphate dans le processus de phosphorylation du substrat catalysé par l'enzyme est représenté en bleu cyan. Droite : Modèle tridimensionnel construit par homologie pour l'arginine kinase du crabe, <i>Scylla paramamosain</i> (11).	61
Figure 26 : Alignement de la séquence de l'arginine kinase du ver à soie <i>Bombyx mori</i> (<i>Bombm1</i>) avec les arginines kinases de la blatte européenne <i>Blattella germanica</i> (<i>Blag9</i>), de la crevette tigrée <i>Penæus monodon</i> (<i>Penm2</i>), et de l'acarien <i>Dermatophagoides pteronyssinus</i> (<i>Derp20</i>). Les acides aminés identiques sont en lettres blanches sur fond noir et les acides aminés homologues en lettres noires sur fond gris (11).	61
Figure 27 : Quantités minimum et maximum de bactéries et levures potentiellement pathogènes pour l'humain retrouvées dans différents insectes comestibles frais en logarithme d'unité formant colonies par gramme d'insecte (152).	65
Figure 28 : Photo de <i>Zonocerus variegatus</i> prise au Ghana - source : Stephen Buchan.....	85
Figure 29 : Photos de différents stades de développement du ténébrion - source : Caracolus.....	93
Figure 30 : Photo d'un élevage de larves de TM, nourries avec un mélange de farine de blé, de malte et de carotte. – source : nutrigreenplanet.....	95
Figure 31 : Larves de <i>Tenebrio molitor</i> grillées prêtes à consommer – source : Aperetik	99
Figure 33 : Photos sablés aux fromages et aux ténébrion à gauche et salade de ténébrions à droite - source : recettesinsectes.....	106

Table des tableaux

Tableau I : Contribution du secteur animalier aux émissions de CO ₂ et causes principales (59).	33
Tableau II : Teneur calorique (kcal) pour 100g de matière fraîche de différents insectes (79).	41
Tableau III : Proportion d'acide gras et composition des principaux acides gras de différentes espèces d'insectes consommés au Cameroun (93). AGMI : Acide gras monoinsaturé, AGPI : acide gras poly-insaturé et AGS : acide gras saturé.....	45
Tableau IV : Apport journalier recommandé en minéraux essentiels comparé à l'apport de 100g de poids sec de différent insecte et du muscle semi-membraneux du bœuf (90,92,101–103).	46
Tableau V : Quantité de vitamine dans 100g de poids sec de différents insectes comparé aux apports journaliers recommandés (92).	49

Tableau VI : Teneur en protéine et consommation en eau par quantité de matière ou de protéine comestible produite pour différent animaux (126). Les vers de farines utilisés sont : Tenebrio molitor et Zophobas morio	54
Tableau VII : Nombre de différents élevages d'insectes où il a été retrouvé différents parasites pathogènes pour l'humain (12).....	72
Tableau VIII : Exemples d'micromycètes retrouvées dans des insectes comestibles (96,168,171,203–206).....	78
Tableau IX : Différentes bactéries retrouvées dans le microbiote intestinal de Tenebrio molitor issus d'élevages (152).	97
Tableau X : Quantité d'élevages où différents parasites ont été retrouvés sur 300 élevages différents de vers de farine (12).	97
Tableau XI : Normes du Kenya et de la Belgique concernant différents contaminants retrouvés dans les produits à base d'insecte (261).....	101

Table des annexes

Annexe I : Études scientifiques disponibles sur la composition microbienne des insectes comestibles frais ou transformés (2000-2019) (152).	132
Annexe II : Principaux germes bactériens, virus, micromycètes et parasites impliqués dans les toxiinfections et les intoxications alimentaires (257,266,267).....	140
Annexe III : Synthèses des valeurs maximums réglementaires européennes pour différentes substances concernant la viande, le poisson et les crustacés (268). Les valeurs peuvent être comprises entre différents niveaux en fonction de la partie de l'animal.....	141
Annexe IV : Teneur calorique, en protéine, en lipide, en fibre, en minéraux et en vitamines de 100g de Tenebrio molitor (adulte, larve et chrysalide) (103)	142

Abréviation

AGMI	Acide gras monoinsaturé
AGPI	Acide gras polyinsaturé
AGS	Acide gras saturé
AJR	Apport journalier recommandé
CCD	Complex Carbohydrate Determinants
CE	Communauté Européenne
EFSA	Autorité européenne de sécurité des aliments
FAO	Food and Agriculture Organization : organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
GES	Gaz à effet de serre
GWP	Potentiel de réchauffement global
HACCP	Hazard Analysis Critical Control Point
IgE	Immunoglobuline de type E
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OMS	Organisation mondiale de la santé
qPCR	quantitative Polymerase Chain Reaction
RA	Résistance aux antibiotiques
<i>TM</i>	<i>Tenebrio molitor</i>
UE	Union Européenne
ufc	Unité formant colonie
VIH	Virus de l'immunodéficience humaine
WUR	Wageningen University & Research

Préambule

Il est largement admis qu'en 2050, le monde accueillera 9 milliards d'habitants. Pour nourrir cette population, la production alimentaire actuelle devra presque doubler. La superficie des terres cultivables n'est pas extensible à l'infini. Les océans sont surexploités. Le changement climatique et les pénuries d'eau pourraient avoir de profondes répercussions sur la production alimentaire. Pour relever les défis actuels en matière d'alimentation et de nutrition (il y a près d'un milliard de personnes souffrant de sous-nutrition chronique dans le monde), il est nécessaire de réévaluer notre production, ce que nous consommons et donc de trouver de nouveaux moyens de produire des aliments. Il est urgent de trouver des solutions alternatives aux sources conventionnelles d'apport de protéines animales dans notre alimentation. La consommation d'insectes par l'humain, ou entomophagie, contribue donc de manière positive à la préservation de l'environnement et des moyens d'existence (1).

Nourrir une population mondiale croissante avec des consommateurs plus exigeants nécessitera nécessairement une augmentation de la production alimentaire. Cela exercera inévitablement une forte pression sur des ressources déjà limitées telles que la terre cultivable, les océans, les engrais, l'eau et l'énergie. Si la production agricole reste dans sa forme actuelle, l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) ainsi que la déforestation et la dégradation de l'environnement se poursuivront. Ces problèmes environnementaux, en particulier ceux liés à l'élevage, nécessitent une attention urgente. Le bétail et le poisson sont d'importantes sources de protéines dans la plupart des pays. Selon l'organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), la production animale représente 70% de toute l'utilisation des terres agricoles. La demande mondiale de produits de l'élevage devant plus que doubler entre 2000 et 2050 (de 229 millions de tonnes à 465 millions de tonnes), répondre à cette demande nécessitera des solutions innovantes. De même, la production et la consommation de poisson ont considérablement augmenté au cours des cinq dernières décennies. En conséquence, le secteur de l'aquaculture a explosé et représente maintenant près de 50% de la production mondiale de poisson. La croissance durable du secteur dépendra largement de l'approvisionnement en protéines végétales terrestres et aquatiques pour l'alimentation animale. L'option de l'utilisation des insectes pour répondre à la demande croissante de produits carnés et pour remplacer la farine et l'huile de poisson peut être une opportunité. Les installations de production de bétail et de poisson à grande échelle sont économiquement viables en raison de leur productivité élevée, au moins à court terme. Cependant, ces installations entraînent d'énormes coûts environnementaux

(2). Le fumier, par exemple, contamine les eaux de surface et les eaux souterraines avec des nutriments, des toxines (métaux lourds) et des agents pathogènes (2). En 2010, Sachs a fait valoir que l'agriculture était la principale cause des changements climatiques d'origine anthropique et que le monde avait besoin de nouvelles technologies agricoles et de nouveaux modes de consommation alimentaire fondés sur des régimes alimentaires plus sains et plus durables. Nourrir les populations futures nécessitera le développement de sources alternatives de protéines, telles que la viande cultivée, les algues, les protéagineux, les champignons et les insectes (3).

Déjà connus pour fournir des services écosystémiques essentiels tels que la pollinisation, le compostage, la protection contre les incendies de forêt et la lutte contre les ravageurs, les insectes, comme nourriture pour l'être humain, s'avèrent être une source de protéine intéressante par leur faible impacts environnemental. Cependant, il est nécessaire de vérifier l'innocuité de cette source alimentaire pour l'humain.

L'entomophagie constituera-t-elle une solution pertinente, garantissant la sécurité alimentaire et la santé des populations ?

Par ce travail, je souhaite faire un état des lieux des avantages et des risques de l'entomophagie sur la santé humaine. Dans une première partie, j'introduirai la pratique de l'entomophagie depuis les temps anciens jusqu'à nos jours : quels insectes sont consommés où, par qui et dans quels cadres ? Au cours de cette introduction, j'évoquerai les avantages sociaux et environnementaux de ce type d'alimentation. Dans une seconde partie, j'aborderai les avantages sur la santé humaine : nutrition et sécurité alimentaire. La troisième partie sera dédiée aux risques allergiques, toxiques et microbiologiques de l'entomophagie. Dans une quatrième partie, j'analyserai les risques et je proposerai des solutions potentielles en prenant l'exemple de l'élevages du ténébrion en Europe.

Introduction

I. Histoire de l'entomophagie

Au cours des 400 millions d'années écoulées, l'évolution a donné naissance à une grande variété d'espèces d'arthropodes. Environ 1 million des 1,4 million d'espèces animales décrites sur Terre sont des insectes et il en existe très probablement des millions d'autres (4). Toutes les populations du monde consomment des insectes dans leur régime alimentaire depuis des millénaires. La première mention de l'entomophagie peut être trouvée dans la littérature biblique (1).

1. Entomophagie et religion

Les pratiques alimentaires sont influencées par la ou les cultures, qui ont été historiquement influencées par les croyances religieuses. L'entomophagie est citée dans la littérature religieuse dans les religions chrétienne, juive et islamique.

« Cependant, vous pouvez manger ces choses rampantes qui volent sur les quatre, qui ont des jambes au-dessus de leurs pieds, pour sauter même sur la terre »

Bible, Lévitique XI: 21

« Les sauterelles sont les troupes d'Allah, vous pouvez les manger »

Sunaan ibn Majah, 4.3219, 3220

L'entomophagie est également présente dans la littérature juive. Amar a suggéré que la consommation de certaines espèces de criquets casher était largement acceptée dans les temps anciens (5).

2. Entomophagie dans les temps anciens

La première référence à l'entomophagie en Europe était en Grèce, où manger des cigales était considéré comme une délicatesse. Aristote (384–322 avant notre ère) a écrit dans son *Historia Animalium* : *« La larve de la cigale en atteignant sa pleine taille dans le sol devient une nymphe ; alors il a meilleur goût, avant que la balle ne soit brisée [c'est à dire avant la dernière mue] »*. Les références à l'entomophagie ont perduré dans toute la région et au cours des siècles. Dans la Rome antique, l'auteur, philosophe et naturaliste naturel Pline l'Ancien a parlé du cossus, un plat très convoité par les Romains. Selon Bodenheimer, le cossus est la larve du longicorne *Cerambyx cerdo*, qui vit sur les chênes (6). La littérature de la Chine ancienne cite également la pratique de l'entomophagie. Le Compendium de la matière médicale de Li Shizhen, l'un des livres les plus importants et les plus complets sur la médecine

chinoise de la dynastie Ming (1368-1644), présente un bilan impressionnant de tous les aliments, y compris un grand nombre d'insectes. Le recueil met également en évidence les avantages médicaux des insectes (1).

3. Entomophagie moderne

L'entomologiste et naturaliste italien Ulysse Aldovandi, né en 1522, est considéré comme le fondateur de l'étude moderne des insectes. *De Animalibus Insectis Libri Septem* d'Aldovandi, publié en 1602, est riche de références et de concepts issus de ses études ainsi que d'observations originales. Aldovandi, un spécialiste des cigales, a suggéré que les insectes étaient des aliments importants dans les anciennes civilisations d'Extrême-Orient, en particulier la Chine, il y a plusieurs siècles avant notre ère. Pourtant, ce n'est qu'au XIXe siècle, lorsque les explorateurs ont rapporté des observations des pays tropicaux, que le monde occidental s'est familiarisé avec la pratique de l'entomophagie. En 1857, l'explorateur allemand Barth Heinrich écrivait dans son livre « Voyages et découvertes en Afrique du Nord et en Afrique centrale » que les personnes qui mangeaient des insectes « *apprécient non seulement la saveur agréable du plat, mais prennent également une agréable revanche sur les ravageurs de leur champs* ». Aux États-Unis, des essaims de criquets des montagnes Rocheuses (*Melanoplus spretus*) ont régulièrement balayé la moitié ouest du pays au XIXe siècle, dévastant les cultures (7). Le principal entomologiste américain Charles Valentine Riley, nommé en 1868 comme premier entomologiste de l'État du Missouri, a étudié les ravages des criquets des montagnes Rocheuses dans les états de l'ouest étatsunien entre 1873 et 1877. Il a préconisé de contrôler les criquets simplement en les mangeant (7).

L'entomologiste britannique V.M. Holt a eu sans doute le plus d'influence pour démocratiser l'entomophagie grâce à son livret publié en 1885 intitulé « *Why Not Eat Insects ?* ». Par ce livre il demandait à ses compatriotes anglais d'envisager l'idée de consommer des insectes. Holt était très perplexe devant le manque d'acceptation des insectes comme nourriture, alors que la composition des autres animaux considérés comme des mets délicats, comme le homard, était presque la même. Cependant, il a fait la distinction entre les insectes qu'il considérait comme « impurs » et donc non comestibles (comme la mouche commune) et les insectes « propres » (comme les sauterelles) (8).

La conférence « *Des insectes pour nourrir le monde* », organisée conjointement par la FAO et l'Université de Wageningen aux Pays-Bas, a réuni 450 participants venus de 45 pays. En janvier 2015, une revue scientifique intitulée « *Insects as Food and Feed* » a été lancée (9). Récemment, de nombreux chercheurs s'intéressent aux insectes comestibles par exemple

Ramos Elorduy au Mexique ou Malaisse en République démocratique du Congo (9). Les premières publications sur les insectes comestibles sont retrouvées au milieu du XXème siècle. Cependant il y a peu de publication concernant l'entomophagie. Il faudra attendre le début des années 2000 pour voir un intérêt de la communauté scientifique pour ce mode d'alimentation (figure 1).

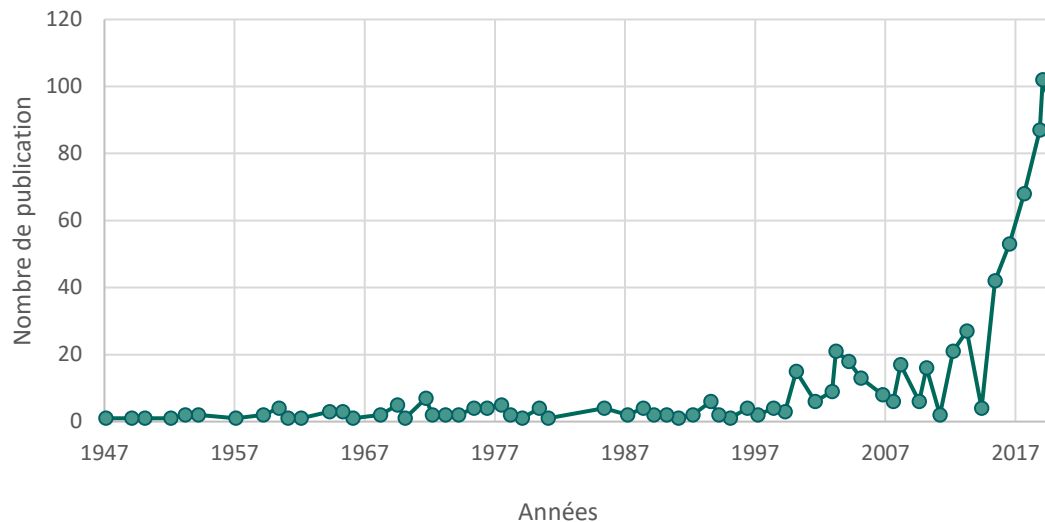


Figure 1 : Graphique montrant le nombre de publication par année sur Pubmed avec les mots clés Insect, Edible et Food

II. Où mange-t-on des insectes ?

La consommation d'insectes n'est pas un concept nouveau dans de nombreuses régions du monde. Il est difficile d'estimer le pourcentage de personnes mangeant des insectes. Les statistiques nationales ne prennent pas ces aliments en considération, cependant des chercheurs estiment que la consommation d'insectes est régulièrement pratiquée par au moins 2 milliards d'humains sur Terre (figure 2) (1,10). Traditionnellement confinée à différents pays d'Asie, d'Afrique et d'Amérique du Sud, l'entomophagie commence à s'étendre à l'Europe et aux États-Unis. Bien que très limitée, surtout pour des raisons psychologiques et culturelles, l'entomophagie tend à se développer avec l'émergence, dans différents pays d'Europe, d'une production industrielle d'insectes comestibles, associée à l'ouverture de restaurants spécialisés (11).

Des estimations régionales et nationales ont identifié 250 espèces comestibles en Afrique, 549 espèces au Mexique, 170 en Chine, 160 en République démocratique populaire lao, 164 en Thaïlande et au Viet Nam et 428 Amazonie (12).

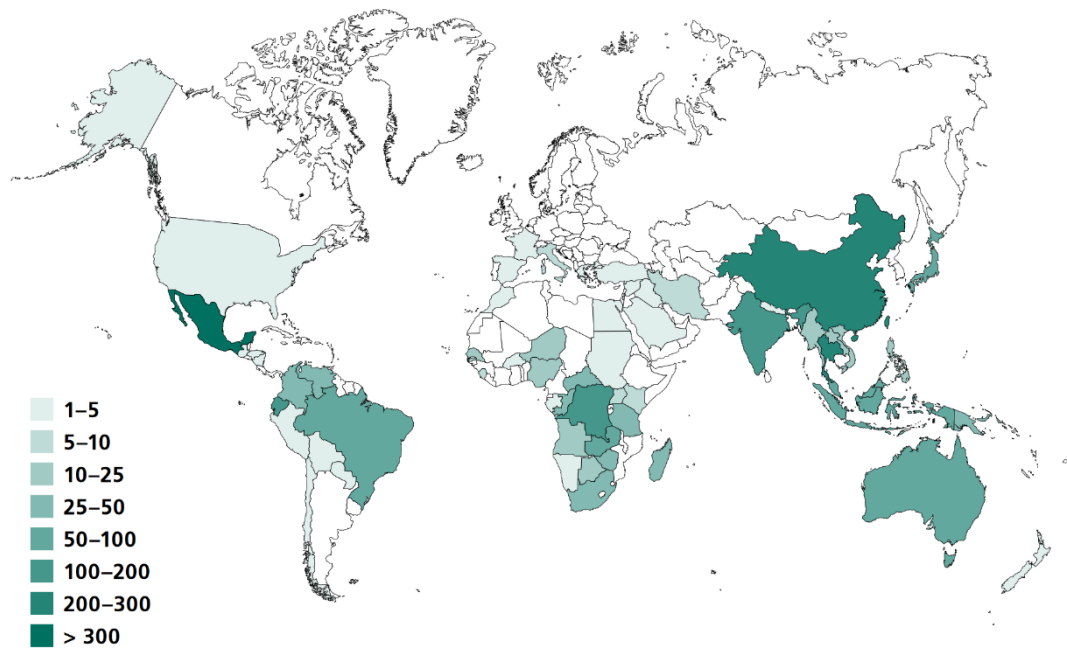


Figure 2 : Echelle en nuance de vert du nombre d'espèce d'insectes comestibles recensé par pays d'après le Center for Geo Information de l'université de Wageningen (1).

Dans de nombreuses régions du monde, la consommation est saisonnière pour deux raisons : les populations locales se nourrissent de plantes saisonnières ; et le surplus n'est pas stocké faute de méthodes de transformation et de conservation. En Afrique de l'Ouest et du Centre, ainsi que dans certaines parties de l'Amazonie, la viande de brousse et les poissons sont rares pendant la saison des pluies, et pendant cette période la consommation d'insectes comestibles augmente considérablement (1).

1. Afrique

Les insectes africains sont abondants sur tout le continent. Pendant la saison des pluies (lorsque la chasse du gibier ou du poisson peut être problématique) les insectes jouent un rôle important dans la sécurité alimentaire. Les chenilles sont particulièrement populaires pendant la saison des pluies, bien que leur disponibilité puisse varier, dans le même pays en fonction des conditions climatiques (13). Takeda et Sato ont bien documenté la disponibilité saisonnière et la consommation corrélée d'insectes. Une étude réalisée dans la forêt tropicale humide en République démocratique du Congo montre les ressources remarquables du peuple Ngandu, nourri à partir des ressources disponibles en saison : plantes cultivées et cueillies dans la nature, champignons, mammifères, oiseaux, poissons, reptiles et insectes (figure 3) (1).

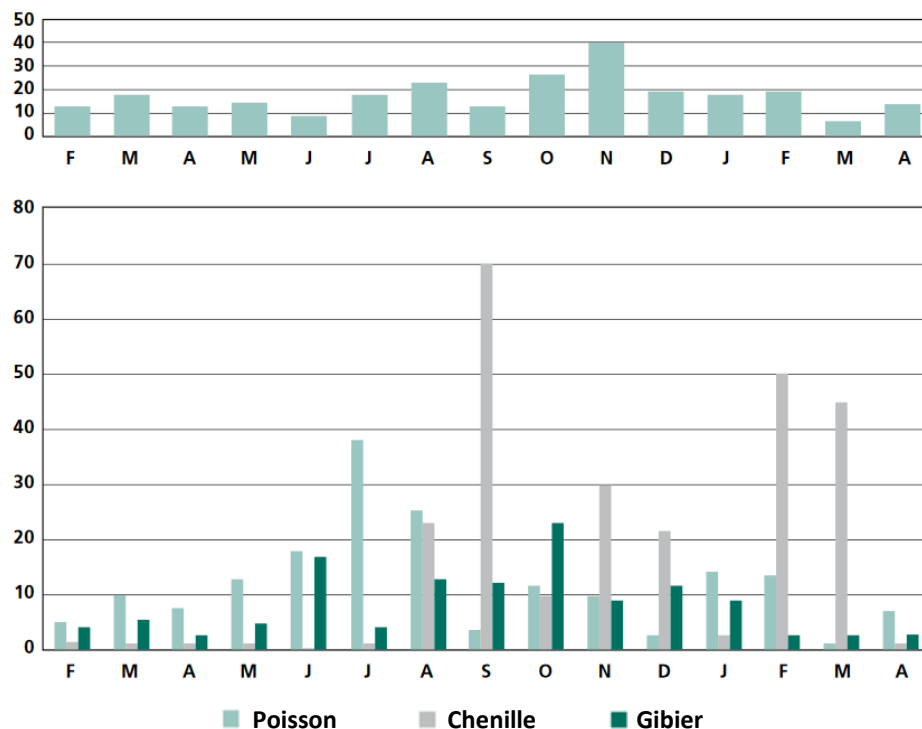


Figure 3 Pluviométrie mensuelle (en haut) et occurrence mensuelle des repas de poisson, de chenilles et de gibier sur une période de 15 mois consécutifs dans la région du lac Tumba, République démocratique du Congo (1).

Les marchés de Kinshasa, capitale de la République démocratique du Congo, offrent une abondance de chenilles toute l'année, et le ménage moyen à Kinshasa consomme environ 300 g de chenilles par semaine. On estime que 96 tonnes de chenilles sont consommées chaque année dans la ville (1). Il s'agit en très grande majorité de la chenille mopane : on estime que 70% des 8 millions d'habitants de Kinshasa se nourrissent de chenilles, tant pour leur valeur nutritive que pour leur goût (13). Pendant la saison des pluies, la consommation moyenne est estimée à 42 chenilles fraîchement récoltées par personne et par jour. La consommation pendant le reste de l'année est bien inférieure, bien que les insectes soient disponibles toute

l'année, séchés ou fumés. Il a été démontré que les indigènes Gbaya consomment 96 espèces d'insectes différentes ; cela représente 15% de leur apport en protéines (14). Dans certains endroits, la consommation d'insectes est corrélée à la disponibilité des aliments de base. A Madagascar, la consommation de riz diminue à la fin de la saison sèche et la consommation de chenilles augmente (1).

2. Asie

Entre 150 et 200 espèces d'insectes comestibles sont consommées en Asie du Sud-Est. Les charançons rouges (*Rhynchophorus ferrugineus*) du palmier sagou sont particulièrement populaires sur tout le continent et sont un mets très prisé dans de nombreuses régions (15). Au Myanmar, en Thaïlande et au Viet Nam, diverses espèces d'insectes sont collectées tout au long de l'année dans divers habitats ; de cette manière, les habitants peuvent obtenir un approvisionnement constant en insectes comestibles (16). Dans de nombreux pays asiatiques les migrations ont contribué au développement de l'entomophagie. A titre d'exemple, les insectes constituent depuis longtemps une part importante de l'alimentation dans le nord-est de la Thaïlande, mais du fait de la migration de main-d'œuvre vers les zones touristiques du sud du pays, notamment à Bangkok, cette pratique est désormais bien établie dans tout le pays (17). On estime que jusqu'à 81 espèces d'insectes sont consommées dans les zones rurales et urbaines. En outre, plus de 50 espèces d'insectes sont consommées en Asie du Sud (Inde, Pakistan et Sri Lanka), 39 espèces en Papouasie-Nouvelle-Guinée et dans les îles du Pacifique et 150 à 200 espèces en Asie du Sud-Est (16).

3. Amérique latine et Amérique du sud

Au Mexique, les peuples autochtones possèdent une connaissance approfondie des espèces végétales et animales qui constituent traditionnellement leur régime alimentaire, y compris le cycle de vie des insectes (18). En Amazonie, la cueillette d'insectes est également une pratique saisonnière. Les Indiens Maku, un groupe autochtone de chasseurs-cueilleurs vivant dans la forêt tropicale du nord-ouest de l'Amazonie au Brésil, capturent des insectes pendant la saison des pluies (de juillet à septembre) lorsque la chasse du poisson et du gibier est difficile (19). Sur les hauts plateaux équatoriens, le coléoptère *Platycoelia lutescens* est présent sur les marchés de Quito pendant la saison des pluies, de fin octobre à début novembre. Cependant, tous les insectes ne sont pas récoltés pendant la saison des pluies. Par exemple, les larves des charançons d'Amérique du Sud (*Rhynchophorus palmarum*) et du charançon barbu (*Rhinostomus barbirostris*) sont collectées par les Joïti du nord-est de l'Amazonie, au Venezuela, de septembre à janvier (20).

4. Occident

Manger des insectes est toujours tabou dans de nombreuses sociétés occidentalisées. La nature non conventionnelle de l'entomophagie a fait que l'élevage d'insectes destinés à l'alimentation humaine et animale, a été largement absent des grandes innovations agricoles qui ont émergé au cours des siècles précédents ; à quelques exceptions près, comme les abeilles, les vers à soie et les cochenilles. Les insectes n'ont pas non plus figuré à l'ordre du jour des agences de recherche et de développement agricoles en occident. Il n'est donc pas surprenant que les insectes manquent encore dans l'alimentation de nombreux pays riches et que leur vente pour la consommation humaine fasse partie d'un secteur de niche (1).

Aux États-Unis, le secteur privé s'est beaucoup intéressé au développement de produits à base de cricket : barres protéinées, farine et biscuits. En Europe, seuls les grillons, le ver de farine jaune *Tenebrio molitor*, le ver de farine *Alphitobius diaperinus* et le criquet migrateur *Locusta migratoria* sont commercialisés. En 2015, une chaîne de supermarchés comptant plus de 500 points de vente aux Pays-Bas vend des hamburgers et des escalopes contenant environ 16% de farine de vers de farine. Dans de plus en plus de pays européens, comme les Pays Bas ou la France, les insectes peuvent également être achetés lyophilisés, soit dans les supermarchés, soit par Internet. Des livres de cuisine présentent des recettes à base d'insectes du monde entier (21) et d'autres avec des insectes disponibles localement (22).

III. Les insectes les plus consommés

De nombreuses espèces d'insectes sont consommées dans le monde. Environ 2000 selon une estimation de la FAO.

1. Grands groupes d'insectes comestibles

Fournir des chiffres définitifs sur le nombre d'espèces d'insectes comestibles dans le monde est difficile pour plusieurs raisons. Premièrement, il est peu probable qu'un individu entomophage décrive un insecte selon sa nomenclature linnéenne, ce qui rend les estimations officielles complexes. Les choses sont compliquées par l'utilisation dans de nombreuses cultures de plusieurs noms vernaculaires pour la même espèce d'insecte. En s'en tenant aux seuls noms latins et en corrigeant les synonymes, Yde Jongema de WUR a procédé à un inventaire mondial qui utilise la littérature, y compris celle de pays occidentaux et de régions tempérées. Il a répertorié 1 900 espèces d'insectes comestibles dans le monde divisées en différents groupes (figure 4) (23).

Les principaux insectes comestibles situés dans l'arbre taxonomique des arthropodes

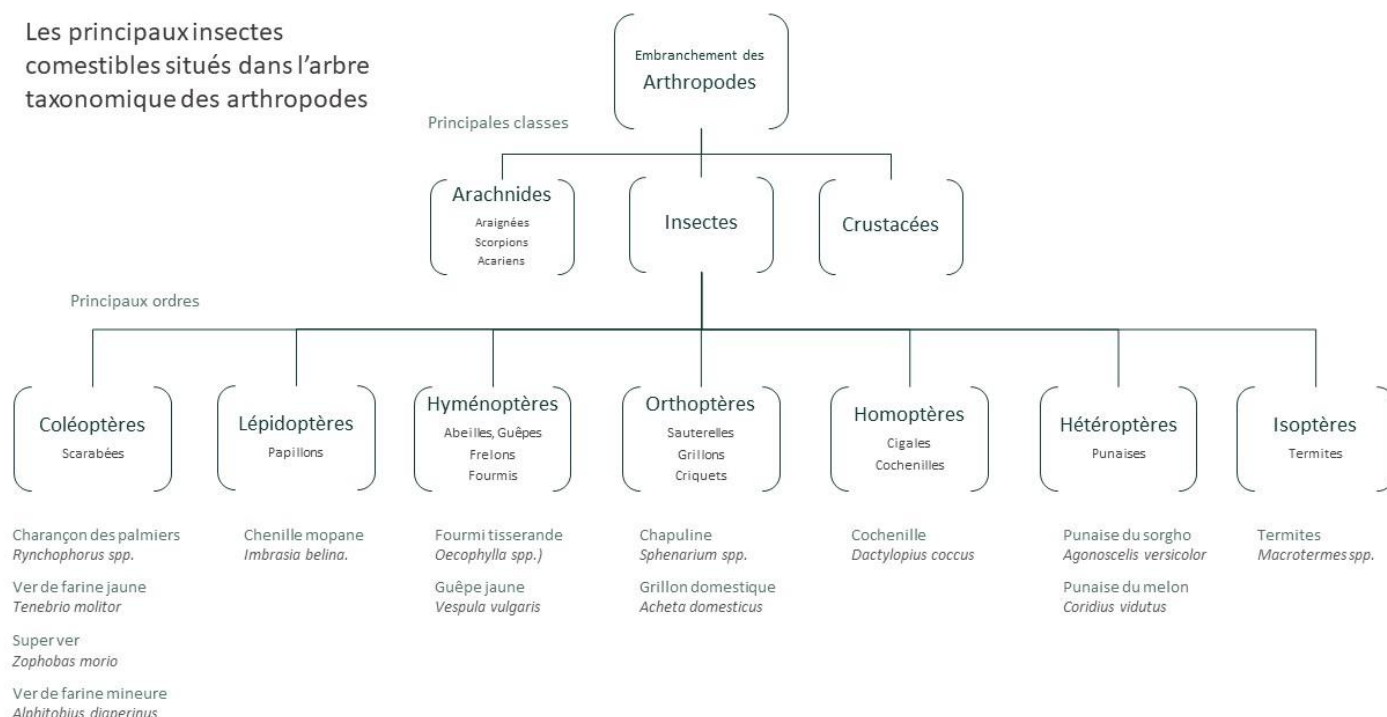


Figure 4 : Les principaux insectes comestibles situés dans l'arbre taxonomique des arthropodes (1,24–28).

À l'échelle mondiale, les insectes les plus couramment consommés sont les scarabées (Coléoptère) (31%), les chenilles (Lépidoptère) (18%) et les abeilles, les guêpes et les fourmis (Hyménoptère) (14%). Celles-ci sont suivies par les sauterelles, les criquets et les criquets (Orthoptères) (13%), les cigales, les cicadelles, les phytophages et les punaises (Hémiptères) (10%), les termites (Isoptères) (4%), les libellules (Odonates) (3%), les mouches (Diptères) (2%) et les autres insectes (5%) (figure 5).

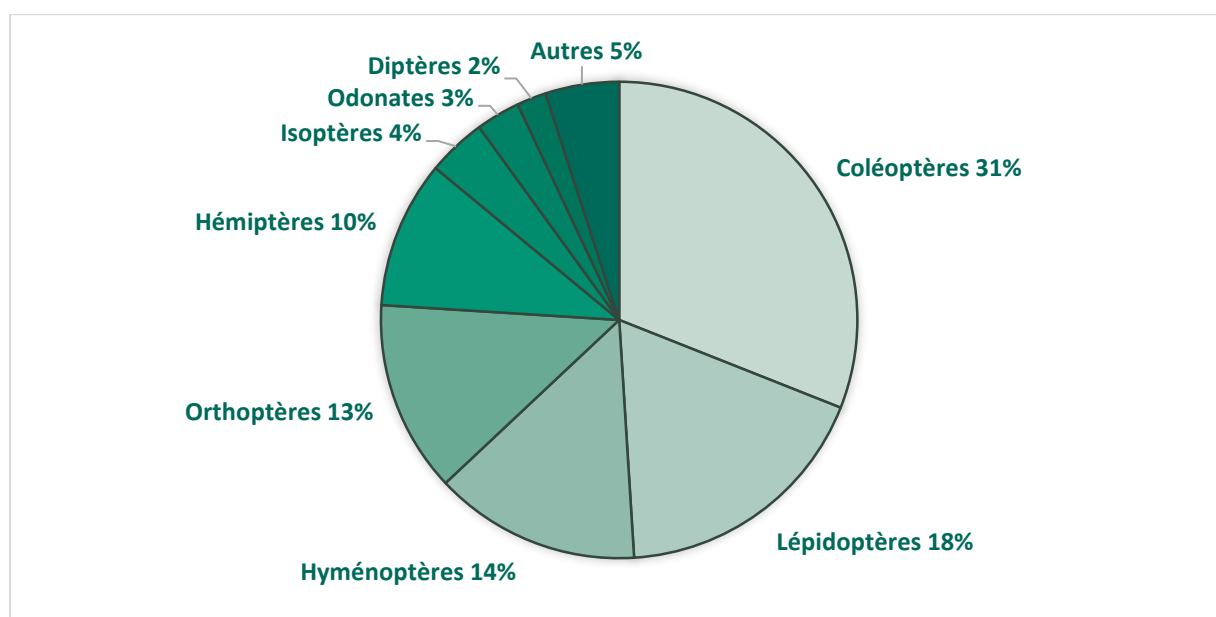


Figure 5 : Comparaison des espèces d'arthropodes comestibles autres que les crustacés (1).

a. Coléoptères (scarabées) :

Il existe de nombreux types de coléoptères comestibles, y compris les coléoptères aquatiques, les larves foreuses du bois et les coléoptères de la bouse (larves et adultes). Ramos Elorduy, Pino et Martinez-Camacho ont répertorié 78 espèces de coléoptères aquatiques comestibles, appartenant pour la plupart aux familles *Dytiscidae*, *Gyrinidae* et *Hydrophilidae* (29). En règle générale, seules les larves de ces espèces sont consommées.

i. Le genre *Rynchophorus*

Le scarabée comestible le plus populaire sous les tropiques est de loin le charançon des palmiers, *Rynchophorus spp*, un ravageur des palmiers important réparti dans toute l'Afrique, l'Asie du Sud et l'Amérique du Sud. Les larves du charançon des palmiers sont consommées en Asie (*R. ferrugineus*), en Afrique (*R. phoenicis*) et en Amérique latine (*R. palmarum*). Sous les tropiques, les insectes sont présents toute l'année, là où se trouvent des hôtes. Les palmiers tombés peuvent servir de sites de reproduction et héberger des centaines de larves ; pour cette raison, les palmiers sont souvent coupés intentionnellement. Des expériences menées dans des villages de l'Alto Orinoco ont exploré différentes manières de rendre la production de charançons des palmiers plus durable que la coupe traditionnelle des palmiers pour améliorer la ponte (1,30).



Figure 6 : Photo d'un *Rynchophorus ferrugineus* MHNT à gauche et photo d'un plat à base de larve de charançon du palmier à droite – Sources : Wikipédia et IRD

ii. La famille *Tenebrionidae*

Aux Pays-Bas, les larves d'espèces de vers de farine de la famille des *Tenebrionidae*, telles que le ver de farine jaune (*Tenebrio molitor*), le ver de farine mineure (*Alphitobius diaperinus*) et le super ver (*Zophobas morio*) sont élevés pour nourrir les animaux domestiques des reptiles, des poissons et des oiseaux. Ils sont également considérés comme particulièrement propres à la consommation humaine et sont proposés en tant qu'aliments pour humains dans des magasins spécialisés. L'un des plus grands fournisseurs de vers de farine au monde est HaoCheng Mealworm Inc., qui vend 50 tonnes d'insectes vivants par mois

et jusqu'à 200 000 tonnes d'insectes séchés par an (31). La popularité de la consommation de vers de farine par les humains est en augmentation, surtout en Europe (12).



Figure 7 : Photo d'un *Tenebrio molitor* à gauche et des larves de *Tenebrio molitor* grillées et sous forme de poudre à droite - Source : Wikipédia et web-agri

b. Lépidoptères (papillons) :

Les papillons sont généralement consommés au cours de leurs stades larvaires (c'est-à-dire sous forme de chenilles), les papillons adultes sont aussi consommés, néanmoins la pratique est plus limitée (32). Les chenilles font partie des groupes d'insectes comestibles les plus divers au monde. En République démocratique du Congo, les chenilles représentent 40% du total des protéines animales consommées (24). Malaisse a identifié 38 espèces de chenilles différentes en République démocratique du Congo, en Zambie et au Zimbabwe (33). Latham a documenté 23 espèces comestibles dans le Bas-Congo, une province de l'ouest de la République démocratique du Congo (24). La récolte de la chenille n'est pas exclusive à l'Afrique. En Asie, la chenille de bambou (*Omphisa fuscidentalis*) est un aliment populaire que le Département thaïlandais des forêts du Ministère de l'agriculture et des coopératives considère comme une source de revenus de plus en plus viable (16). Au Mexique, dans la région du Chiapas, les habitants consommeraient jusqu'à 27 espèces de chenilles (1).

i. Chenille mopane

La chenille mopane (*Imbrasia belina*) est sans doute la chenille la plus consommée et la plus importante sur le plan économique. Endémique des forêts de mopanes en Angola, au Botswana, au Mozambique, en Namibie, en Afrique du Sud, en Zambie et au Zimbabwe, l'habitat de la chenille s'étend sur environ 384 000 km² de forêt (34). Bien que les chenilles soient des sources nutritionnelles importantes en période de soudure (période de l'année précédant les premières récoltes où la nourriture peut venir à manquer), elles font également partie du régime alimentaire tout au long de l'année (25). La collecte, la transformation, le commerce et la consommation de la chenille mopane font partie intégrante des cultures

locales, mais il s'agit surtout d'une stratégie de subsistance parmi les groupes marginalisés (35). On estime que 9,5 milliards de chenilles mopane sont récoltées chaque année en Afrique australe. La vente des chenilles rapporte 85 millions de dollars américains par an (36).



Figure 8 : Photo de chenilles mopane cuisinées – Source : Globalvoice

c. Hyménoptères (guêpes, abeilles et fourmis)

Parmi les hyménoptères, les fourmis sont les plus consommées. Elles sont des mets recherchés dans de nombreuses régions du monde (26). Par exemple, la fourmi tisserande (*Oecophylla spp.*) est utilisée comme agent de lutte biologique dans diverses cultures. Les larves et les nymphes de la forme reproductive sont populaire en Asie. En Thaïlande, ils sont vendus en conserve (37). Shen, Li et Ren ont signalé que la fourmi noire est largement répandue dans le sud-est subtropical de la Chine, au Bangladesh, en Inde, en Malaisie et au Sri Lanka. Elle est utilisée comme complément nutritionnel et transformée en divers toniques ou aliments diététiques disponibles sur le marché chinois (38). L'administration nationale des aliments et des médicaments et le ministère chinois de la Santé ont approuvé plus de 30 produits de santé contenant des fourmis depuis 1996.

Au Japon, les larves de guêpes jaunes, sont couramment consommé. Pendant le festival annuel Hebo, les produits alimentaires fabriqués à partir des larves de guêpes sont des mets délicats à tel point que l'approvisionnement local est insuffisant et que les importations en provenance d'Australie et du Viet Nam sont indispensables (1).

d. Orthoptères (sauterelles, criquet et grillons)

Environ 80 espèces de sauterelles sont consommées dans le monde et la grande majorité des espèces de sauterelles sont comestibles. Des criquets peuvent se former en essaims, ce qui les rend particulièrement faciles à récolter. En Afrique, le criquet pèlerin, le criquet rouge et le criquet brun sont consommés. (39). Au Niger il n'est pas rare de trouver des sauterelles sur les marchés locaux ou vendues comme en-cas au bord des routes. De

manière remarquable, les chercheurs ont constaté que les sauterelles collectées dans les champs de mil avaient un prix plus élevé sur les marchés locaux que le mil (27).

En Asie, les grillons *Gryllus bimaculatus*, *Teleogryllus occipitalis* et *Teleogryllus mitratus* sont récoltés dans la nature et sont généralement consommés comme nourriture. En 2012, on comptait environ 20 000 producteurs de cricket en Thaïlande. En dépit de la pratique extensive de l'élevage d'insectes, seules deux espèces de grillons comestibles (*Gryllus bimaculatus* et *Acheta domesticus*) sont exploitées de manière rentable. Cependant, la République démocratique populaire du Laos et le Cambodge montrent des signes de changement : les vendeurs disent maintenant que les consommateurs préfèrent les grillons cultivés à ceux récoltés dans la nature parce qu'ils ont meilleur goût (1).

i. La chapulines (Sphenarium spp.)

La chapuline est probablement la sauterelle comestible la plus connue d'Amérique latine. Cette petite sauterelle fait partie de l'alimentation locale depuis des siècles et est toujours consommée dans plusieurs régions du Mexique. Nettoyés et grillés dans un peu d'huile avec de l'ail, du citron et du sel pour la saveur, elle constitue un ingrédient alimentaire courant parmi les communautés autochtones mais aussi la population urbaine de la ville de Oaxaca (40).

La sauterelle *Sphenarium purpurascens* est un ravageur de la luzerne, mais également l'un des insectes comestibles les plus importants du Mexique. Les pêcheurs utilisent des filets pour battre légèrement les plants de luzerne, permettant ainsi à chaque famille locale de se procurer environ 50 à 70 kg de sauterelles par semaine (41).



Figure 9 : Photo de chapulines grillé sur un marché mexicain – Source : INRA

ii. *Acheta domesticus*

Le grillon domestique (*Acheta domesticus*) est également élevé et couramment consommé, en particulier en Thaïlande, et est préféré aux autres espèces en raison de son corps mou. Dans une étude réalisée en Thaïlande en 2002, 53 des 76 provinces du pays avaient des élevages de grillon (16). Le grillon domestique est consommé par les humains sous forme de poudre ou d'extraits de protéines. Les grillons entiers sont consommés directement en Thaïlande.



Figure 10 : Photo de grillons grillés (*Acheta domestica*) prêt à manger à gauche et paquet de poudre de grillon (*Acheta domestica*) à droite – Source : Next-food

e. Homoptères (cigales, cicadelles et cochenilles)

Au Malawi, plusieurs espèces de cigales (*Platypleura spp.* et *Pycna spp.*) sont considérées comme un aliment. Les cigales peuvent être trouvées sur les troncs des arbres et récoltées à l'aide de longs roseaux ou d'herbes recouverts d'un résidu de colle, tels que le latex de l'arbre *Ficus natalensis*. Le latex adhère aux ailes des cigales, qui sont enlevées avant consommation (28).

f. Hétéroptères (punaises)

Les punaises du genre *Pentatomidae* sont largement consommées dans toute l'Afrique subsaharienne, en particulier en Afrique australe. En République du Soudan, le pentatomide *Agonoscelis versicolor*, un ravageur du sorgho pluvial qui provoque des dégâts considérables, est consommé grillé (42). Cependant, la plupart des pentatomides consommés comme aliments vivent dans l'eau. Le célèbre caviar mexicain, ahuahutle, est composé des œufs d'au moins sept espèces d'hémiptères aquatiques (familles des *Corixidae* et des *Notonectidae*). Ces insectes constituent la colonne vertébrale de l'agriculture aquatique ou de l'aquaculture au Mexique depuis des siècles. La semi-culture de ces espèces est simple et peu coûteuse car elle peut être entreprise sur la base de pratiques locales traditionnelles (43). Les insectes atteignent des prix élevés, en particulier pendant la Semana Santa (la semaine précédant

Pâques). En Afrique australe, la punaise *Encosternum delegorguei* est considéré comme un met délicat. D'autres punaises sont consommées au Malawi, en Afrique du Sud et au Zimbabwe (27), tandis que les espèces de *Tessarotoma papillosa* (punaise du litchi), *Tessarotoma javanica* (punaise du longan) et *Tessarotoma quadrata* sont très recherchées en Chine, en République démocratique populaire du Laos et en Thaïlande (44). Les punaises apportent une contribution importante au régime alimentaire en milieu rural dans de nombreuses régions du monde. Au Zimbabwe, les punaises puantes constituent une source de revenu précieuse pour la communauté de Norumedzo et sont essentielles pour l'achat d'articles ménagers et la couverture des frais de scolarité (45).

g. Isoptères (termites)

Les espèces de termites les plus consommées sont les grandes espèces du genre *Macrotermes*. Les termites ailés émergent après la première saison des pluies, à la fin de la saison sèche, à partir de trous situés à proximité des nids de termites. Van Huis a observé qu'en Afrique, les habitants battaient le sol autour des collines de termites (simulant de fortes pluies) pour faire émerger les termites (27).

Dans le monde occidental, les termites sont généralement synonymes d'organismes nuisibles et sont réputés pour leur capacité à dévorer le bois. Les dégâts causés par les termites coûteraient plus d'un demi-milliard de dollars par an rien qu'aux États-Unis. Pourtant, les termites sont considérés comme un met délicat dans de nombreuses régions du monde. Elles sont consommées à la fois comme plat principal et comme plat d'accompagnement, ou simplement comme collation après avoir été dépouillés, frits et séchés au soleil (46). Les reines termites sont considérées comme des mets particulièrement précieux, souvent réservés à des occasions spéciales (27).

2. Les produits issus d'insectes

En plus de servir de source de nourriture, les insectes fournissent à l'humain une variété d'autres produits de valeur. Une multitude de produits apicoles - notamment le miel, la propolis et la cire d'abeille - sont bien connus du public et sont largement documentés. Il est de notoriété publique que le tissu de soie est obtenu à partir de vers à soie. Pourtant, le grand public ignore qu'une foule d'autres insectes se trouvent dans la plupart des armoires de cuisine, des médicaments et d'autres produits ménagers.

a. Cochenille

La cochenille (carmin) est un colorant rouge obtenu principalement à partir de *Dactylopius coccus* et est utilisé dans les industries alimentaire, textile et pharmaceutique. Les îles Canaries, le Chili, l'Équateur, le Pérou et la Bolivie sont les plus gros producteurs de cochenille. Entre 2000 et 2006, la production mondiale a été multipliée par 2,5 par la demande croissante liée à l'intérêt suscité par les colorants naturels dans l'industrie alimentaire. En 2006, la production nationale au Pérou s'élevait à 2 300 tonnes (85% de la production mondiale), pour une valeur à l'exportation de 39,6 millions de dollars. Les plus gros importateurs de colorant carmin sont le Brésil, le Danemark, la France, l'Allemagne et les États-Unis (1).



Figure 11 : Photo du colorant extrait des cochenilles à gauche et photo d'un groupe de cochenille *Dactylopius coccus* à droite – Sources : Wikipedia et Agrimaroc

b. Ver à soie

La production de vers à soie est une pratique ancienne dans de nombreuses régions d'Asie, ainsi qu'en Europe depuis son introduction après les croisades. En Chine, les preuves de la production de vers à soie remontent à 5 000 ans. La célèbre route commerciale connue sous le nom de Route de la soie s'étendait de la Chine orientale à la mer Méditerranée, faisant du commerce de la soie, entre autres produits, une affaire internationale dès 139 ans avant notre ère. La production de vers à soie revêt également une importance économique considérable, notamment en Chine et en Inde, où la production annuelle atteint respectivement 115 000 et 20 410 tonnes. Les papillons mâles servent également à la fabrication de produits diététiques (dont des vins diététiques). En outre, les nymphes sont traditionnellement consommées et vendues sur de nombreux marchés et par les épiceries du nord-est de la Chine (47). Les chrysalides du ver à soie sont couramment consommées dans d'autres pays asiatiques, notamment au Japon, en Thaïlande et dans la péninsule coréenne. Environ 137 000 ménages (en particulier des ménages ruraux pauvres) élèvent des vers à soie

en Thaïlande, contribuant à 80% de la production totale de vers à soie du pays. La production de 2004 a généré environ 50,8 millions d'euros (48).



Figure 12 : Chrysalide de ver à soie *Bombyx mori* prêt à être consommé - Source : Wikipedia

c. Abeille

Les abeilles produisent différentes substances utilisées par les humains depuis des millénaire. En plus du miel, consommé pour son pouvoir sucrant supérieur au saccharose, les abeilles produisent la gelée royale, très riches en nutriments. Elles fabriquent également différents matériaux de construction tel que la cire, utilisé en cosmétique et la propolis (mortier et anti-infectieux assainissant de la ruche) qui est consommée par les humains pour ses propriétés antibiotiques et antifongiques (1). Des recherches récentes se sont intéressées aux propriétés thérapeutiques du venin d'abeille et son composant majeur : la mélittine, qui permet de réduire les réponses immunitaires excessives et fournit une alternative nouvelle pour le contrôle des maladies inflammatoires (49).

d. Lerp

La lerp est une sécrétion sucrée cristallisée produite par les larves de psylliodes (appartenant à l'ordre des hémiptères) sous la forme d'une enveloppe protectrice. Les psylliodes excrètent un grand nombre de substances car la sève du phloème sur laquelle ils se nourrissent est riche en glucides et pauvre en nutriments essentiels, en particulier azotés ; ainsi, ils doivent aspirer de grandes quantités de sève pour obtenir suffisamment de nutriments et l'excédent est excrété sous forme de miellat. Les cônes des psylliodes sont constitués de l'insecte lui-même, de la sécrétion et des cinq exosquelettes rejetés par l'insecte lors de ses mues. Les structures coniques adhèrent aux feuilles. Le cône entier de l'insecte est mangé. Plusieurs centaines d'espèces de psylliodes producteurs de lerp sont présentes sur des espèces d'Eucalyptus en Australie (50).



Figure 13 : Lerp de *Glycaspis brimblecombei* - source : Nathistoc

e. *Huiles comestibles de punaises*

La punaise du melon (*Coridius vidutus*) est largement répandue dans toute la République du Soudan, principalement dans les régions occidentales des États du Kordofan et du Darfour. Les punaises du melon sont généralement cuites à leur dernier stade de nymphe, lorsqu'elles sont relativement molles. En Namibie, les habitants collectent les adultes et les utilisent comme relish ou épice (sous forme de poudre). Dans l'État occidental du Kordofan, l'huile extraite des punaises (après trempage dans l'eau chaude), connue localement sous le nom d'um-buga, est une source importante de nutriments. Cette huile est utilisée dans la cuisine dans les régions reculées de l'ancien Soudan. Elle prend une part importante dans l'alimentation lorsque la nourriture est rare. L'huile de punaise du melon est utilisée en médecine, par exemple pour soigner les lésions cutanées (51). Outre les avantages nutritionnels des punaises du melon, leur huile possède des propriétés antibactériennes. Mustafa, Mariod et Matthäus ont testé l'huile contre sept isolats bactériens et ont trouvé une activité antibactérienne élevée. Ils ont conclu que l'huile pourrait potentiellement être utilisée comme conservateur dans les produits carnés pour contrôler les bactéries gram-positives (52). La recherche a également montré que seules de très légères modifications chimiques ont lieu dans l'huile de punaise du melon conservée à des températures inférieures à 30 °C pendant deux ans. De plus, il a été démontré que la stabilité à l'oxydation de l'huile de tournesol était améliorée en la mélangeant aux huiles comestibles très stables de la punaise du melon (ainsi que de la punaise du sorgho) (53). Dans les parties occidentales de l'ancien Soudan, des punaises de sorgho (*Agonoscelis pubescens*) adultes sont collectés et mangés frits, et dans certaines régions l'huile est extraite des punaises et également utilisée pour la cuisine et la médecine (51).

IV. Récolte et élevage

Les insectes comestibles occupent une grande variété d'habitats, allant des écosystèmes aquatiques et des terres cultivées aux forêts. Jusqu'à récemment, les insectes étaient une ressource en apparence inépuisable pouvant être obtenue par récolte dans la nature. Cependant, certaines espèces d'insectes comestibles sont maintenant en péril. Un certain nombre de facteurs anthropiques, tels que la surexploitation, la pollution, les incendies et la dégradation des habitats, ont contribué au déclin de nombreuses populations d'insectes. Les changements climatiques vont probablement affecter la distribution et la disponibilité des insectes dans des proportions plus importantes encore. La plupart des insectes comestibles sont récoltés dans la nature. Cependant, certaines espèces, telles que les abeilles et les vers à soie, ont une longue histoire d'élevage en raison de la valeur de leurs produits. Les insectes sont également élevés en grand nombre à des fins de lutte biologique (prédateurs et parasitoïdes, par exemple), de santé (traitement contre les mouches) et de pollinisation. Le concept d'insectes d'élevage pour l'alimentation est toutefois relativement nouveau ; La culture du cricket en République démocratique populaire du Laos, en Thaïlande et au Viet Nam est un exemple d'élevage destinés à la consommation humaine sous les tropiques. Dans les zones tempérées, l'élevage est principalement pratiqué par des entreprises familiales qui élèvent des insectes tels que les vers de farine, les criquets et les sauterelles en grande quantité, principalement comme nourritures pour les animaux de compagnie ou pour les zoos. Ces entreprises n'ont été en mesure de commercialiser les insectes pour la consommation humaine que récemment, et la part de leur production destinée à la consommation humaine directe est encore minimale. En Thaïlande, 20 000 exploitations de cricket domestiques produisent en moyenne 7 500 tonnes d'insectes par an pour la consommation domestique et pour le marché (54). En Thaïlande, la culture des insectes se développe rapidement et offre des revenus importants et des moyens de subsistance à des dizaines de milliers de Thaïlandais engagés dans la culture, la transformation, le transport et la commercialisation des insectes (55).



Figure 14 : Photo de grillons élevés pour la consommation humaine – source : Micronutris

V. Environnement et social

1. Bioconversion des déchets organiques

Les insectes en tant que source alternative de protéines pour la création d'aliment pour animaux présentent un intérêt environnemental évident : ils peuvent être élevés de manière durable sur des flux latéraux organiques (par exemple, fumier, lisier de porc et compost). L'utilisation de flux latéraux organiques commence par l'élevage des insectes sur les biodéchets. Les espèces telles que la mouche soldat noire (*Hermetica illucens*), la mouche domestique commune (*Musca domestica*) et le ver de farine jaune (*Tenebrio molitor*) sont très efficaces pour la bioconversion des déchets organiques. Pour cette raison, ces espèces suscitent une attention croissante, car elles pourraient convertir 1,3 milliard de tonnes de biodéchets par an (56).

La possibilité d'élever des insectes sur des déchets organiques pour la consommation humaine est toujours à l'étude, étant donné les risques inconnus de pathogènes et de contaminants (1).

2. Émission de gaz à effet de serre et d'ammoniac

La durabilité de la consommation de viande a été mise en doute, le secteur de l'élevage étant responsable de plus de 18% des émissions de GES (CH₄ et NH₄) et de 59% des émissions mondiales d'ammoniac d'origine agricole (tableau I) (57,58). L'élevage a donc une part de

responsabilité des émissions de GES équivalent au secteur des transports (59). Le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O) ont un potentiel de réchauffement global (GWP) supérieur au CO₂ : si le CO₂ a une valeur de 1 GWP, le CH₄ a un GWP de 23 et le N₂O a un GWP de 289 (60).

Tableau I : Contribution du secteur animalier aux émissions de CO₂ et causes principales (59).

	Dioxyde de carbone CO ₂	Méthane CH ₄	Dioxyde d'azote NO ₂
Emission globale	9%	35 – 40%	65%
Causes	<ul style="list-style-type: none"> • Production d'engrais • Dépenses énergétiques • Transport des aliments et des animaux • Transformation des produits • Culture des terres 	<ul style="list-style-type: none"> • Fermentation entérique des ruminants • Fumier 	<ul style="list-style-type: none"> • Fumier • Urine

Parmi les espèces d'insectes, seules les blattes, les termites et les scarabées produisent du CH₄ (61), qui provient du développement de bactéries du genre *Methanobacteriaceae* (62). Pourtant, les insectes jugés viables pour la consommation humaine dans le monde occidental comprennent des espèces telles que les larves de vers de farine, les grillons et les criquets, qui se comparent favorablement aux porcs et aux bovins de boucherie dans leurs émissions de GES (elles sont inférieures d'un facteur d'environ 100) (63). Les déchets du bétail (urine et fumier) contribuent également à la pollution de l'environnement qui peut conduire à la nitrification et à l'acidification du sol (64). Les larves de vers de farine, les grillons et les criquets se comparent également favorablement aux porcs dans les émissions d'ammoniac (environ 10 fois inférieur) (figure 16) (63). Ces résultats sont tirés d'études à petite échelle réalisées en laboratoire et il convient d'être prudent dans les comparaisons avec la production de porc et de bœuf à grande échelle. Cependant, il est probable que les émissions de GES par l'élevage d'insecte soient considérablement inférieures aux émissions par l'élevage des mammifères pour une quantité équivalente de protéine, et ceci même à grande échelle (figure 15).

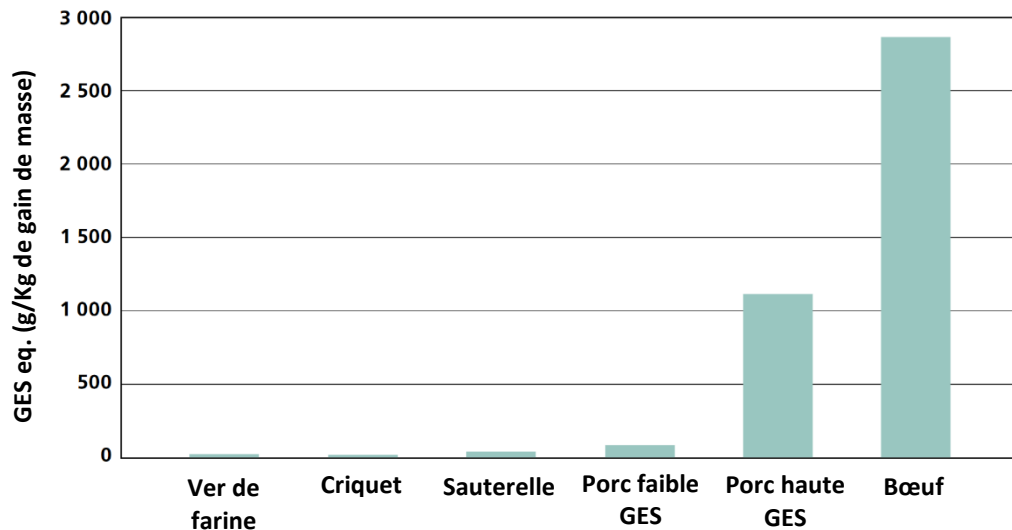


Figure 15 : production de GES par kg de gain de masse pour trois espèces d'insectes, les porcs à faible production de GES (Porc faible GES), les porcs à haute production de GES (Porc haute GES) et les bœufs (63).

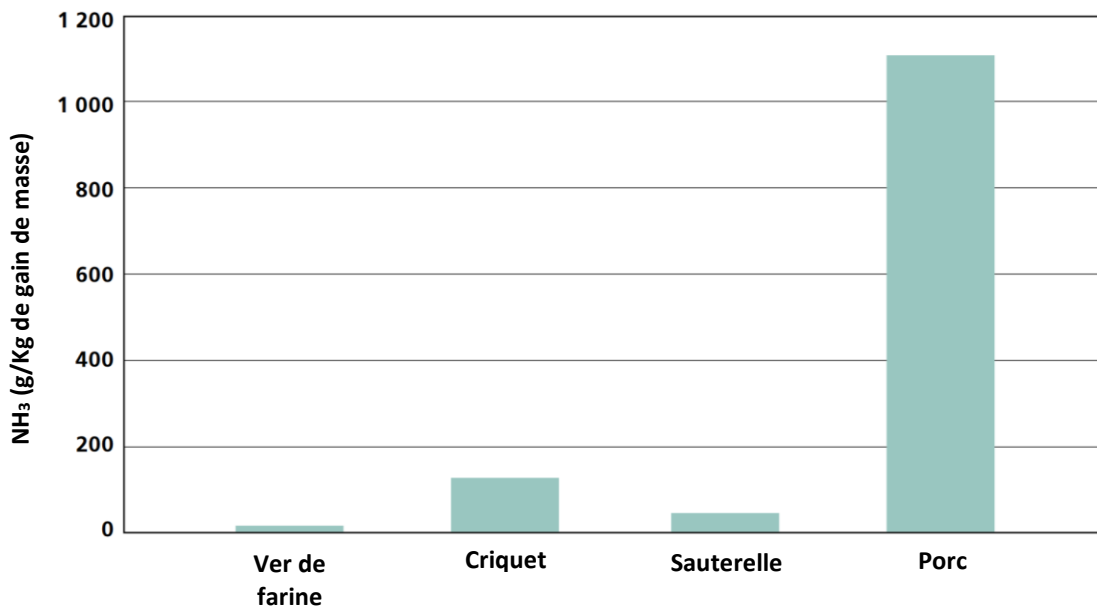


Figure 16 : production d'ammoniac par kg de gain de masse pour trois espèces d'insectes, les porcs (63).

3. Surface d'élevage nécessaire

Pour chaque hectare (ha) de terrain requis pour produire des protéines de vers de farine (*Tenebrio molitor*), 2,5 ha seraient nécessaires pour produire une quantité similaire de protéines de lait, 2 à 3,5 ha seraient nécessaires pour produire une quantité similaire de protéines de porc ou de poulet, et 10 ha seraient nécessaires pour produire une quantité similaire de protéines de bœuf. Les vers de farine sont donc une source de protéines animales plus respectueuse de l'environnement que le lait, le poulet, le porc et le bœuf (figure 17) (65).

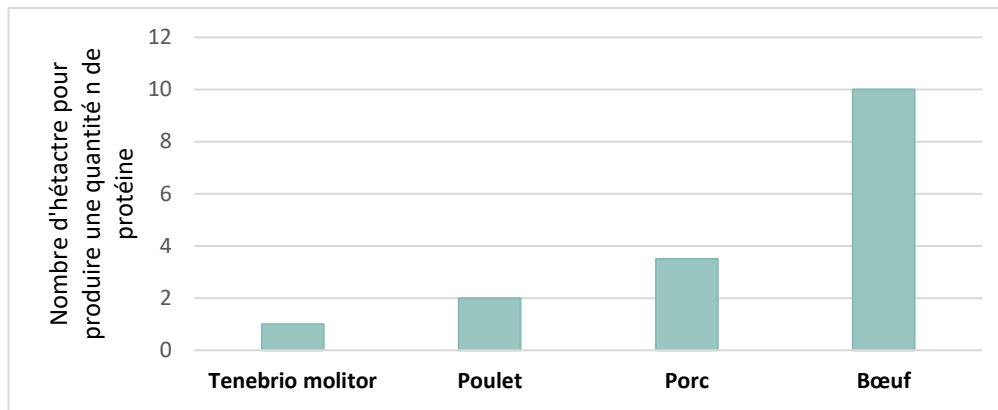


Figure 17 : Graphique montrant l'espace en hectare nécessaire pour produire une quantité similaire de protéine en fonction de l'animal (Ver de farine, poulet, porc ou bœuf) (65).

4. Bien-être animal

En ce qui concerne les animaux d'élevage intensif, Brambell a décrit les normes auxquelles l'industrie de la production animale devrait aspirer : absence de faim, de soif, d'inconfort, de douleur, de blessure, de maladie, de peur et de détresse, et l'expression d'un comportement normal (66). Comme de nombreux mammifères en culture intensive, les insectes sont généralement élevés dans de petits espaces confinés. Pour assurer le bien-être des animaux, les insectes d'élevage devraient disposer d'un espace adéquat, qui dépend du niveau d'interaction des individus au sein de leur espèce dans des conditions naturelles. Par exemple, les criquets sont toujours grégaires et se produisent naturellement en fortes densités. Les vers de farine ont également tendance à se regrouper. Dans les installations d'élevage, des conditions optimales sont recherchées pour minimiser la mortalité et augmenter la productivité. La communauté scientifique sait peu de choses sur la mesure dans laquelle les insectes ressentent de la douleur et de l'inconfort (67). Jusqu'à ce qu'une preuve concluante que les insectes ressentent de la douleur soit rassemblée, Eisemann et ses collègues ont suggéré que le principe de précaution devrait être appliqué. Les méthodes de destruction des insectes qui réduiraient la souffrance comprennent la congélation ou des techniques instantanées telles que le déchiquetage (68).

5. Revenu

La plupart des insectes récoltés par les ruraux sont destinés à leur consommation personnelle. Cependant, tout excédent est susceptible d'être vendu sur les marchés locaux et régionaux. En Papouasie, en Indonésie, par exemple, les communautés autochtones consomment entre 60 et 100 espèces d'insectes comestibles pour diversifier leurs besoins alimentaires. A titre d'exemple, l'excédent de charançon du palmier noir (*Rhynchophorus bilineatus*) est vendu sur des marchés. Le prix d'un sac contenant 100 à 120 larves se vend

2,11 \$ US, d'une valeur comparable à 20 œufs de poule et 3 kg de riz (1). Cependant, certains insectes sont collectés davantage pour la vente que pour la consommation personnelle. Pour la plupart des habitants des zones rurales, en particulier les plus pauvres, les forêts et les arbres sont d'importantes sources de nourriture et de revenus. Quelque 350 millions de personnes parmi les plus pauvres du monde - dont 60 millions appartenant à des peuples autochtones - dépendent des forêts pour leur subsistance quotidienne et leur survie à long terme (69).



Figure 18 : Une femme récoltant des sauterelles au Laos – source : Harmke Klunder

La cueillette et l'élevage des insectes au niveau des ménages ou à l'échelle industrielle peuvent offrir d'importants moyens de subsistance aux populations des pays en développement et des pays développés. Dans les pays en développement, certains des membres les plus pauvres de la société, notamment les habitants sans terre des zones urbaines ont des revenus monétaires grâce à la vente de la production excédentaire. Les insectes peuvent être directement et facilement capturés dans la nature ou élevés avec un minimum de moyens techniques ou d'investissements (1). Dans le bassin du Congo et au Cameroun, les larves du charançon africain sont consommées par la majorité des habitants (70). Leur exploitation et leur commerce par les communautés de la forêt constituent une source de revenu importante, représentant souvent plus de 20% de toutes les activités économiques (agriculture, pêche, chasse, etc.). Pour les collecteurs d'insectes professionnels, un revenu mensuel moyen de 180 à 600 dollars US est généré, ce qui représente 30 à 75% du revenu de leur ménage. La récolte et la commercialisation des insectes comestibles peuvent

améliorer les moyens de subsistance, en particulier des femmes. A titre d'exemples : la récolte de la chenille de Mopane en Afrique australe, représente une activité de 85 millions de dollars US, principalement réalisée par les femmes (36); la commercialisation de la punaise comestible *Encosternum delegorguei* dans les pays d'Afrique subsaharienne profite principalement aux femmes des communautés rurales pauvres (71); Les nymphes comestibles d'un ver à soie sauvage, élevé commercialement pour la sériciculture à Madagascar, contribuent également à la réduction de la pauvreté (72).



Figure 19 : Vente de chenilles sur un marché à Kinshasa en République démocratique du Congo – source : FAO

VI. Législation

En Europe, la consommation d'insectes reste marginale mais commence à se développer avec la création de petites industries spécialisées dans l'élevage d'insectes comestibles et l'ouverture de quelques restaurants spécialisés. Récemment, en Belgique, l'Agence fédérale pour la sécurité de la chaîne alimentaire, équivalent de l'Agence française de sécurité sanitaire, vient d'autoriser la mise sur le marché de dix espèces d'insectes :

- Le grillon domestique *Acheta domesticus*
- Le criquet migrateur africain *Locusta migratoria*
- Le ver de farine géant *Zophobas atratus morio*
- Le ver de farine *Tenebrio molitor*
- Le ver Buffalo *Alphitobius diaperinus*

- La chenille de la fausse teigne *Galleria melonella*
- Le criquet pèlerin d'Amérique *Schistocerca americana gregaria*
- Le grillon à ailes courtes *Gryllodes sigillatus*
- La chenille de la petite fausse teigne *Achroia grisella*
- Le ver à soie *Bombyx mori*

La mise sur le marché se fait sous réserve du respect des règles générales de législation alimentaire telles que l'application des bonnes pratiques d'hygiène, la traçabilité, l'étiquetage, et dans l'attente « d'une position claire et d'une harmonisation du statut de novel food des insectes au niveau européen » (73).

En effet, selon le règlement (CE) n° 258/97 du Parlement européen du 27 janvier 1997 relatif aux nouveaux aliments et aux nouveaux ingrédients alimentaires, les insectes comestibles destinés à la consommation humaine rentreraient dans la catégorie des nouveaux aliments (novel foods) ou des nouveaux ingrédients alimentaires (novel food ingredients) (11). Le marché intérieur de l'union européenne (UE) exige des aliments strictement sûrs et sains, mais ces règles relatives aux nouveaux aliments doivent être mises à jour, comme le précise le règlement 2015 / 2283EC, qui comprend une démonstration sur l'historique de la sécurité des aliments traditionnels d'un pays tiers et de tout insecte utilisé comme aliment dans l'UE. Ce règlement, adopté en novembre 2015 et entré en vigueur en janvier 2018, a introduit une autorisation centralisée et une procédure d'évaluation (74). Actuellement, tous les produits alimentaires sur le marché nécessitent un nouveau dossier alimentaire depuis janvier 2018, avant d'être mis sur le marché (75).

Avantages

La consommation d'insectes présente un certain nombre d'avantages économiques, sociaux et environnementaux :

- Ils peuvent être élevés sur des flux latéraux organiques, réduisant la contamination environnementale, tout en ajoutant de la valeur aux déchets.
- Leur élevage émet peu de gaz à effet de serre et peu d'ammoniac comparé à l'élevage d'animaux conventionnels.
- Ils ont peu de problèmes de bien-être animal
- Ils demandent peu d'espace pour l'élevage
- Ils peuvent être une source de revenus importante pour des classes de populations pauvres

Du point de vue de la santé, les insectes présentent une composition nutritionnelle très intéressante et ils permettent d'assurer une sécurité alimentaire pour de nombreux peuples car ils sont peu consommateur d'eau tout en convertissant très efficacement les aliments en protéine.

I. Composition nutritionnelle

La malnutrition est encore largement présente. Dans le monde, 821 millions de personnes sont sous-alimentées. Même si la quantité de calories disponibles par habitant est suffisante, le régime alimentaire peut manquer de nutriments majeurs (76) car la nourriture dans les zones rurales est principalement à base de plantes avec une faible teneur en protéines. Une consommation accrue d'insectes peut être un moyen de lutter contre la malnutrition. Les insectes constituent une source alimentaire très nutritive et saine, avec une teneur élevée en matières grasses, protéines, vitamines, fibres et minéraux (1). Cependant, la valeur nutritive des insectes dépend de l'espèce, de l'alimentation, de l'environnement, du stade de développement et des conditions de croissance. Dans certains pays, les insectes sont l'une des principales sources de protéines et fournissent 6 100 kcal et 513 g de protéines par personne et par an (77).

1. Énergie alimentaire

Ramos Elorduy et ses collaborateurs ont analysé 78 espèces d'insectes de l'État d'Oaxaca, au Mexique, et déterminé que la valeur énergétique était de 293–762 kilocalories pour 100 g de matière sèche (18). Par exemple, l'énergie brute (qui est normalement supérieure à l'énergie métabolisable) du Criquet migrateur (*Locusta migratoria*) se situait

entre 598 et 816 kJ pour 100 g de poids frais, selon le régime alimentaire de l'insecte (78). Le tableau II présente les valeurs énergétiques exprimées en kilocalories pour 100 g de poids frais d'insectes sauvages et d'élevage sélectionnés dans le monde.

Tableau II : Teneur calorique (kcal) pour 100g de matière fraîche de différents insectes (79).

Localisation	Nom	Energies (kcal/100g)
Australie	<i>Chortoicetes terminifera</i>	499
Australie	<i>Oecophylla smaragdina</i>	1 272
Québec	<i>Melanoplus femurrubrum</i>	160
Etats-Unis	<i>Tenebrio molitor</i> (larve)	206
Etats-Unis	<i>Tenebrio molitor</i> (adulte)	138
Côte d'Ivoire	<i>MAcrotermes subhyalinus</i>	535
Mexique	<i>Myrmecocystus melliger</i> (larve)	404
Mexique	<i>Myrmecocystus melliger</i> (adulte)	116
Thaïlande	<i>Gryllus bimaculatus</i>	120
Thaïlande	<i>Lethocerus indicus</i>	165
Thaïlande	<i>Oxya japonica</i>	149
Thaïlande	<i>Cyrtacanthacris tatarica</i>	89
Thaïlande	<i>Bombyx mori</i>	94
Pays-Bas	<i>Locusta migratoria</i>	179

Pour comparaison, les mammifères ont une teneur calorique qui diffèrent entre les différentes parties consommées. Elle est entre 101 et 122 kcal/100g pour le veau et le mouton, entre 144 et 231 kcal/100g pour les volailles, entre 114 et 749 kcal/100g pour le porc et entre 115 et 710 kcal/100g pour le bœuf (80). La teneur calorique du soja ou du maïs se situe autour de 450 kcal/100g (81). Pour certaines espèces d'insectes, la teneur calorique dépassent 750 kcal, ce qui est supérieur à celle du soja, du maïs ou du bœuf (82).

2. Protéines et Acides aminés

Les protéines représentent le composant nutritif principal des insectes. De plus, les insectes comestibles peuvent fournir tous les acides aminés essentiels (83). La teneur en protéines des insectes sur la base de la matière sèche varie entre 7 et 91%. Au Mexique, la teneur en protéines de 78 espèces évaluées varie de 15% à 81% de la matière sèche et la digestibilité des protéines varie de 76% à 98% (18). La plupart des espèces comestibles

contiennent environ 60% de protéines (84). La digestibilité des protéines d'insectes est très variable, notamment parce qu'une partie des protéines est liée à la chitine, un polysaccharide composant de l'exosquelette des insectes. La teneur en protéines est souvent plus élevée que celle du soja et voisine de celle de la volaille et du poisson (85). Les insectes concernés par la consommation dans le monde occidental, comme les grillons et les vers de farine, contiennent des quantités de protéines similaires à celles des produits carnés conventionnels. Des recherches récentes indiquent que la consommation de 50 g d'*Eulepida mashona* (coléoptère) et de *Henicus whellani* (grillon) peut contribuer à 30 % de protéines quotidiennes recommandées en moyenne (86). Une autre étude menée par Manditsera a conclu que la cuisson peut diminuer la digestibilité des protéines de 25% pour ces mêmes espèces (*Eulepida mashona* et *Henicus whellani*). La torréfaction doit donc être préférée à l'ébullition. Dans tous les cas, des temps d'ébullition courts sont recommandés (87).

La teneur en protéines varie fortement selon les espèces. Par exemple, les espèces de l'ordre des orthoptères (sauterelles, grillons et criquets) sont riches en protéines et représentent une source de protéines alternative précieuse (Figure 20). Yi et ses collaborateurs ont extrait et caractérisé des fractions protéiques provenant de trois espèces de vers de farine et d'une espèce de cricket. Ils ont conclu que la teneur en protéines de ces espèces était comparable à celle des produits carnés classique (88). La teneur en protéines dépend également de l'alimentation (légumes, céréales, déchets organiques, etc). Au Nigeria, les sauterelles nourries au son, qui contient des niveaux élevés d'acides aminés essentiels, ont presque le double de la teneur en protéines de celles nourries au maïs. La teneur en protéines des insectes dépend également du stade de métamorphose (89) : les adultes ont généralement une teneur en protéines plus élevée que les stades larvaires.

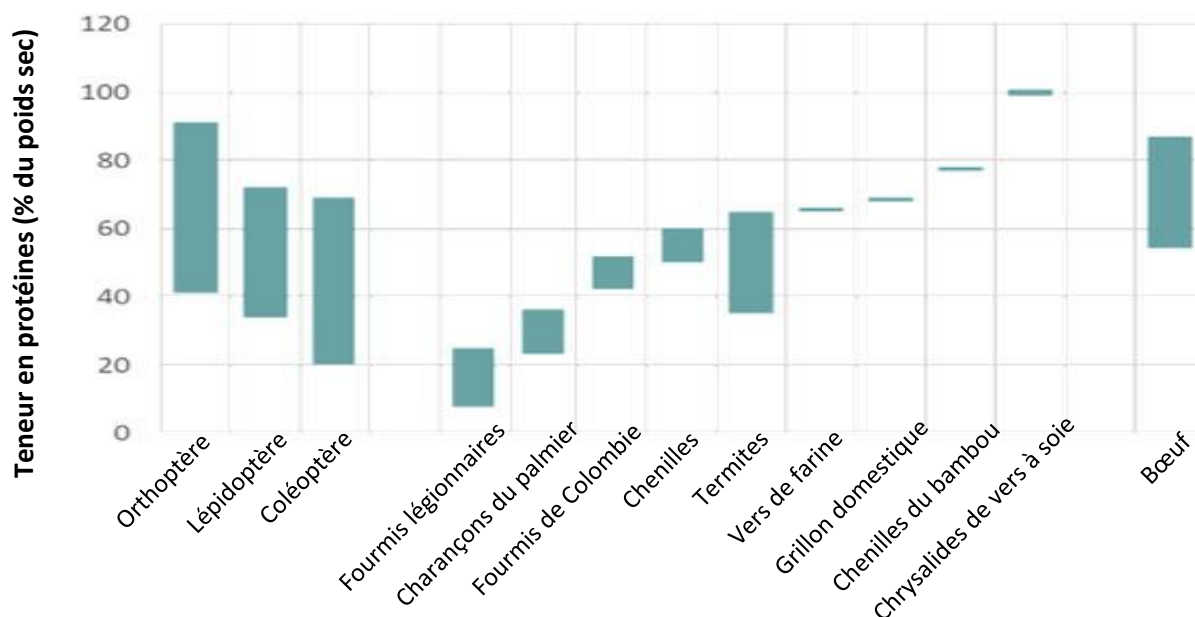


Figure 20 : Teneur en protéines de classes ou d'espèces d'insectes par rapport au bœuf (75)

Les protéines de céréales qui sont des aliments de base dans les régimes alimentaires du monde entier sont souvent pauvres en lysine et, dans certains cas, manquent de tryptophane et de thréonine. Chez certaines espèces d'insectes, ces acides aminés sont très bien représentés (figure 21) (90). A titre d'exemples, plusieurs chenilles de la famille des *Saturniidae*, des larves de charançon du palmier et des insectes aquatiques ont des scores d'acides aminés pour la lysine supérieurs à 100 mg pour 100 g de protéines brutes. Pourtant, afin d'établir des recommandations concernant l'utilisation d'insectes comestibles en complément des régimes alimentaires traditionnels, il est important de considérer ces derniers dans leur intégralité. Il conviendra de comparer leur qualité nutritionnelle avec celle des insectes comestibles disponibles localement. En République démocratique du Congo, par exemple, les chenilles riches en lysine complètent les protéines de base pauvres en lysine. De même, les habitants de Papouasie-Nouvelle-Guinée mangent des tubercules pauvres en lysine et en leucine, mais compensent cet écart nutritionnel en mangeant des larves de charançon du palmier. Les tubercules fournissent du tryptophane et des acides aminés aromatiques, qui sont limités dans les charançons du palmier (90). Dans les pays africains où le maïs est un aliment de base (Angola, Kenya, Nigéria et Zimbabwe) il est parfois constaté des carences en tryptophane et en lysine. Compléter les régimes avec des espèces de termites comme *Macrotermes bellicosus* qui font déjà partie des régimes traditionnels, permet de pallier ces carences. Cependant, toutes les espèces de termites ne présentent pas le même intérêt : *Macrotermes subhyalinus*, par exemple, est pauvre en ces acides aminés (91).

Selon Rumpold et Schlüter, qui ont rassemblé 236 compositions d'éléments nutritifs, les insectes comestibles répondent généralement aux exigences de l'organisation mondiale de la santé (OMS) en ce qui concerne les acides aminés : valeurs élevées en phénylalanine et tyrosine et parfois riches en tryptophane, lysine et thréonine (92).

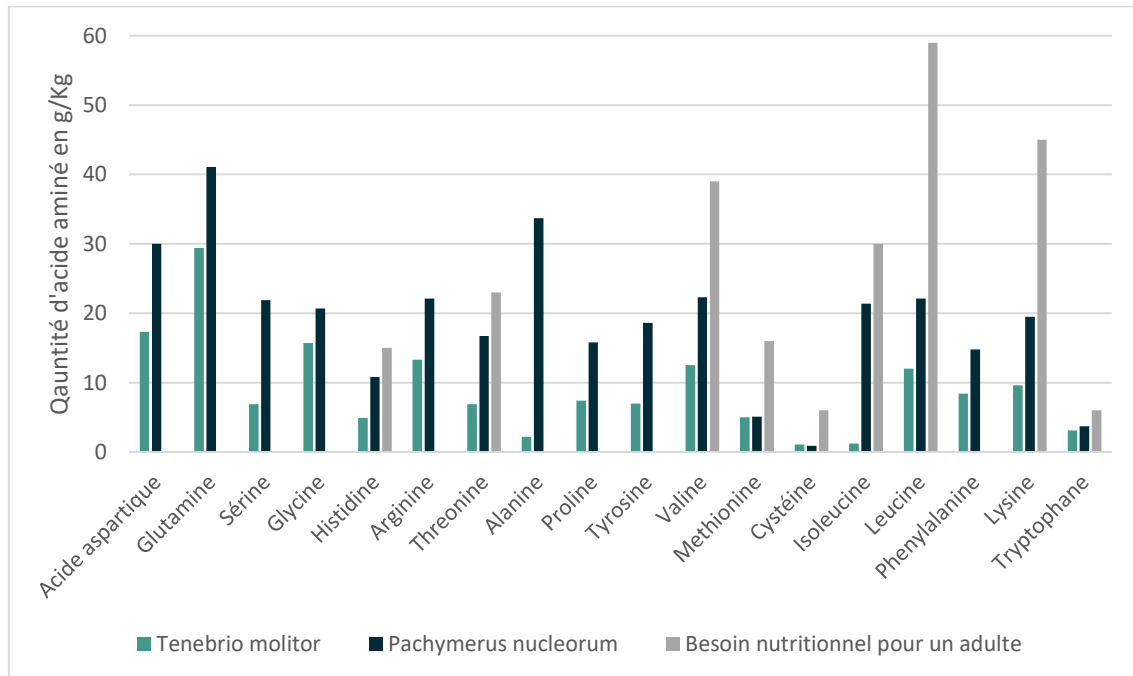


Figure 21 : Composition en acides aminés en g/Kg de Pachymerus nucleorum et de larve de Tenebrio molitor ainsi que les besoins nutritionnelles moyen pour un adulte (9).

3. Matières grasses

Après les protéines, les graisses représentent la deuxième plus grande partie de la composition en nutriments des insectes comestibles, de 13% pour les orthoptères (sauterelles, grillons, criquets) à 33% pour les coléoptères (scarabée, vers blancs) (92). Womeni a étudié la teneur et la composition des huiles extraites de plusieurs insectes (tableau III) (93). Leurs huiles sont riches en acides gras polyinsaturés et contiennent fréquemment les acides linoléique et α -linoléique essentiels. L'importance nutritionnelle de ces deux acides gras essentiels est reconnue, principalement pour le développement sain des enfants et des nourrissons (94). Une attention accrue a été accordée à la consommation insuffisante des acides gras oméga-3 et oméga-6, les insectes pourraient jouer un rôle important, en particulier dans les pays en développement sans littoral ayant un accès plus faible aux produits de la mer (90). A titre d'exemple, le principal acide gras présent dans l'huile extraite des larves de *Pachymerus nucleorum* est l'acide oléique (44,09%), suivi des acides lauriques (33,87%), l'acide stéarique (3,91%) et l'acide linoléique (3,96%).

La teneur et la composition des différents acides gras diffère considérablement en fonction des espèces (92). Elle est également influencée par l'alimentation des insectes (75). La plupart des insectes présentent un rapport d'acides gras saturés / non saturés inférieur à 40%, ce qui est meilleur que celui observé chez le poisson ou le poulet. De plus des acides gras polyinsaturés comme les acides linoléique et linoléique, acides gras essentiels, sont présents. Cette composition favorable, explique que l'huile extraite de *Rhynchophorus phoenicisgrubs* est particulièrement intéressante comme huile comestible (95). Les sauterelles et les fourmis blanches ont également une composition en acides gras favorable, avec, respectivement 60% et 75% de graisses insaturées, une teneur en acide linoléique de 1,4% et 6,7% et une teneur en acide oléique de 44% et 48%. Les vers à soie contiennent 20 à 40% de matières grasses (sur la base du poids sec), avec une grande quantité d'acides gras polyinsaturés. En fait, 11 à 45% des acides gras totaux sont constitués d'acide linoléique (75).

Tableau III : Proportion d'acide gras et composition des principaux acides gras de différentes espèces d'insectes consommés au Cameroun (93). AGMI : Acide gras monoinsaturé, AGPI : acide gras poly-insaturé et AGS : acide gras saturé.

Espèces	Proportion d'acide gras (%)	Principale composition en acide gras		Saturations
<i>Rhynchophorus phoenicis</i>	54%	Acide palmitoléique	38%	AGMI
		Acide linoléique	45%	AGPI
Ruspolia differens	67%	Acide palmitoléique	28%	AGMI
		Acide linoléique	46%	AGPI
		Acide α -linoléique	16%	AGPI
Zonocerus variegates	9%	Acide palmitoléique	24%	AGMI
		Acide oléique	11%	AGMI
		Acide linoléique	21%	AGPI
		Acide α -linoléique	15%	AGPI
Macrotermes spp.	49%	Acide γ -linoléique	23%	AGPI
		Acide palmitique	30%	AGS
		Acide oléique	48%	AGMI
		Acide stéarique	9%	AGS
Imbrasia spp.	24%	Acide palmitique	8%	AGS
		Acide oléique	9%	AGMI
		Acide linoléique	7%	AGPI
		Acide α -linoléique	38%	AGPI

Cependant, la présence d'acides gras insaturés entraînera également une oxydation rapide des produits alimentaires pendant la transformation, et réduira leur durée de conservation (aliments devenant rapidement rances).

4. Minéraux

Les minéraux jouent un rôle important dans les processus biologiques. L'apport nutritionnel recommandé (AJR) est généralement utilisé pour quantifier l'apport quotidien suggéré en minéraux. Le tableau IV compare l'apport journalier recommandé en minéraux pour un homme de 25 ans avec ceux fournis par la chenille mopane. Il est clair que la chenille mopane (comme de nombreux insectes comestibles) est une excellente source de fer. La plupart des insectes comestibles ont une teneur en fer égale ou supérieure à celle du bœuf (90); 6 mg pour 100 g de poids sec pour le bœuf, 31–77 mg pour 100 g pour la chenille mopane. La teneur en fer des criquets migrateurs (*Locusta migratoria*) varie entre 8 et 20 mg pour 100 g de poids sec, en fonction de leur alimentation (63). Les chenilles et les termites contiennent respectivement 35,5 mg de fer / 100 g de poids sec (96) et 27-29 mg de fer / 100 g de poids sec (96). Les sauterelles et la punaise géante d'eau *Lethocerus indicus* contiennent 226 à 238 mg de phosphore pour 100 g de poids sec (97). Les sauterelles et les charançons contiennent 7,54 à 8,21 mg de magnésium pour 100 g. Le bousier *Oryctes ssp.* contient 61,3 mg de calcium par 100 g de poids sec (97), tandis que le charançon du palmier en contient 72,4 mg (98) et les grillons domestiques adultes 76 mg par 100 g de poids sec (99). Les résultats de la composition minérale du charançon africain du palmier montrent qu'un échantillon de 100 g de l'insecte satisfera l'apport journalier recommandé en fer, zinc, cuivre, manganèse et magnésium (100).

Tableau IV : Apport journalier recommandé en minéraux essentiels comparé à l'apport de 100g de poids sec de différent insecte et du muscle semi-membraneux du bœuf (90,92,101–103).

Minéraux	AJR pour un homme de 25 ans (mg/jour)	Bœuf (mg/100g)	Chenille Mopane (mg/100g)	Grillons domestique (mg/100g)	Ver de farine (adulte) (mg/100g)
Potassium (mg)	4 700	1206	1 032	1014	337
Chlorure (mg)	2 300	-	-	-	191
Sodium (mg)	1 500	356	1 024	286	50
Calcium (mg)	1 000	24	174	76-143	150
Phosphore (mg)	700	715	543	1100	368
Magnésium (mg)	400	91	160	103	92

Zinc (mg)	11	9	14	16	4,86
Fer (mg)	8	5,78	31-77	4,7	1,89
Manganèse (mg)	2,3	-	3,95	7,95	0,287
Cuivre (mg)	0,9	-	0,91	3,7	1,60
Iode (mg)	0,15	-	-	-	22
Sélénium (mg)	0,055	-	-	0,06	16,3
Molybdène (mg)	0,045	-	-	-	39

Les teneurs en fer et en zinc sont particulièrement importantes car ces minéraux sont souvent déficients dans les pays en développement (86,92). Une étude récente a conclu que la consommation de 50 g d'*Eulepida mashona* et de *Henicus whellanim* peut contribuer à 30% et 50% des apports quotidiens recommandés en zinc et en fer (86). Deux milliards de personnes souffrent d'une carence en zinc et un milliard présente une carence martiale (104). Les enfants et les femmes en âge de procréer sont particulièrement vulnérables. Contrairement au fer présent dans de nombreuses sources végétales, certains insectes contiennent du fer présentant une meilleure biodisponibilité (105). L'OMS a signalé la carence en fer comme le trouble nutritionnel le plus répandu au monde. Dans les pays en développement, une femme enceinte sur deux et environ 40% des enfants d'âge préscolaire seraient anémiés. Les conséquences sur la santé sont principalement des grossesses pathologiques, une altération du développement physique et cognitif, un risque accru de morbidité chez les enfants et une productivité au travail réduite chez les adultes. L'anémie ferriprive est une carence évitable, mais elle contribue à 20% de tous les décès maternels. Étant donné la forte teneur en fer déjà observée chez plusieurs espèces d'insectes, une évaluation plus approfondie d'autres espèces d'insectes comestibles est justifiée (106). La carence en zinc est un autre problème de santé publique majeur, en particulier pour la santé infantile et maternelle. Les carences en zinc peuvent entraîner un retard de croissance, un retard de la maturation sexuelle et osseuse, des lésions cutanées, de la diarrhée, de l'alopecie, une diminution de l'appétit et une sensibilité accrue aux infections provoquées par des défauts du système immunitaire (106). En général, la plupart des insectes sont considérés comme de bonnes sources de zinc. A titre d'exemple, les larves de charançon du palmier (*Rhynchophorus phoenicis*) contiennent 26,5 mg pour 100 g de poids sec de zinc contre 12,5 mg pour 100 g pour le bœuf (63).

Il est à noter que les méthodes de cuisson peuvent également influencer la bioaccessibilité des micronutriments. Des recherches récentes ont montré que la

bioaccessibilité du fer est plus élevée chez les coléoptères (*Eulepida mashona*) (30,7%) que chez les grillons (*Henicus whellani*) (8,11%), et que l'ébullition réduit la bioaccessibilité du fer et du zinc d'environ 50% chez les deux espèces, tandis que la torréfaction n'a pas d'impact (86). De plus, la composition nutritionnelle des insectes comestibles varie selon le stade de métamorphose de l'insecte (75).

N'ayant pas de squelette minéralisé, la plupart des espèces d'insectes contiennent peu de calcium (84).

5. Vitamines

Les vitamines essentielles pour stimuler les processus métaboliques et améliorer les fonctions du système immunitaire sont présentes dans la plupart des insectes comestibles.

Bukkens a montré pour toute une gamme d'insectes que la thiamine (vitamine B1, vitamine essentielle qui agit principalement comme une coenzyme pour métaboliser les glucides en énergie) variait de 0,1 mg à 4 mg pour 100 g de matière sèche (90). La riboflavine (également connue sous le nom de vitamine B2, dont la fonction est déterminante pour le métabolisme) variait de 0,11 à 8,9 mg pour 100 mg. En comparaison, le pain complet fournit respectivement 0,16 mg et 0,19 mg pour 100 g de B1 et B2. Généralement les taux des autres vitamines B (B3, B5 et B9) ne sont pas très élevés chez les insectes (92) (Tableau V).

La cobalamine ou vitamine B12 ne se trouve que dans les aliments d'origine animale. Elle est bien représentée chez les larves de vers de farine, *Tenebrio molitor* (0,47 µg pour 100 g) et les grillons domestiques, *Acheta domesticus* (5,4 µg pour 100 g chez les adultes et 8,7 µg pour 100 g chez les nymphes). La carence alimentaire en vitamine B12 est un problème grave dans le sous-continent indien, au Mexique, en Amérique centrale et du Sud et dans certaines régions d'Afrique. Elle est aussi fréquente chez les personnes végétariennes (107). Elle peut entraîner un large éventail de troubles hématologiques et neuropsychiatriques (108). Certains insectes peuvent apporter une solution à ce problème. Néanmoins, de nombreuses espèces ont de très faibles niveaux de vitamine B12, c'est pourquoi des recherches supplémentaires sont nécessaires pour identifier les insectes comestibles riches en vitamines B (90).

Du rétinol (vitamine A) et du β-carotène ont été détectés dans certaines chenilles, notamment *Imbrasi oyemensis*, *Imbrasi truncata* et *Imbrasi epimethea*; les valeurs varient respectivement de 32 µg à 48 µg pour 100 g et de 6,8 µg à 8,2 µg pour 100 g de matière sèche pour le rétinol et le β-carotène. Les niveaux de ces vitamines sont inférieurs à 20 µg pour 100 g et inférieurs à 100 µg pour 100 g chez les larves de vers de farine jaunes, les super vers et

les grillons domestiques (78,90). Généralement, les insectes ne sont pas la meilleure source de vitamine A (65).

La vitamine E est présente dans les larves de charançon du palmier (*Rhynchophorus ferrugineus*) (35 mg d'α-tocophérol et 9 mg de β + γ tocophérol pour 100 g de poids sec) et la poudre de vers à soie broyés et lyophilisés (*Bombyx mori*) (9,65 mg de vitamine E totale pour 100 g de poids sec) (109). L'apport quotidien recommandé étant de 15 mg (90), ces espèces peuvent jouer un rôle important dans l'équilibre alimentaire des populations.

Les insectes contiennent peu de vitamine C ou acide ascorbique. De plus, cette vitamine se trouve dans de nombreux autres aliments. Les insectes n'ont pas un grand intérêt dans les carences en vitamine C (92).

Tableau V : Quantité de vitamine dans 100g de poids sec de différents insectes comparé aux apports journaliers recommandés (92).

Vitamine	Exemple d'espèces intéressantes	Quantité pour 100g de poids sec	AJR
A (Rétinol)	<i>Imbrasi spp.</i>	32 – 48 µg	800 µg
	Larve de <i>Bombyx mori</i>	274 µg	
B1 (Thiamine)	<i>Macrotemres nigeriensis</i>	0,67 mg	1,2 mg
	Larve de <i>Bombyx mori</i>	1,91 mg	
	<i>Usta terpsichore</i>	4,04 mg	
B2 (Riboflavine)	<i>Acheta domesticus</i> (nymphe)	4,15 mg	1,3 mg
	<i>Bombyx mori</i> (Larve)	5,43 mg	
	<i>Imbrasia truncata</i>	5,50 mg	
B3 (Nicotinamide)	<i>Bombyx mori</i> (Larve)	15,20 mg	15 mg
	<i>Acheta domesticus</i> (adulte)	12,59 mg	
B5 (Acide pantothénique)	<i>Bombyx mori</i> (Larve)	12,49 mg	5 mg
B8 (Biotine)	<i>Bombyx mori</i> (Larve)	0,41 mg	0,4 mg
B12 (Cobalamine)	<i>Tenebrio molitor</i>	0,47 µg	25 µg
	<i>Acheta domesticus</i>	5,4 µg	
C (Acide ascorbique)	<i>Latebraria amphypirioides</i> (larve)	46,33 mg	45 mg
E (tocophérol)	<i>Rhynchophorus ferrugineus</i> (Larve)	44 mg	15 mg
	<i>Bombyx mori</i> (Larve)	9,65 mg	

6. Fibres

Les fibres sont des glucides alimentaires non digestibles. Elles sont indispensables au bon fonctionnement du transit intestinal et à la santé globale des humains, car elles influencent l'ensemble de nos métabolismes et de toutes nos grandes fonctions, telles que, l'immunité, la trophicité de la muqueuse intestinale, la satiété, etc. Un apport d'au moins 30 g par jour est recommandé. Les fibres sont présentes dans de nombreux légumes, céréales et insectes. La forme de fibre la plus courante chez les insectes est la chitine, une fibre insoluble dérivée de l'exosquelette. Une quantité importante de données est disponible sur la teneur en fibres des insectes, mais elles ont été produites par diverses méthodes et ne sont pas facilement comparables. Finke a estimé la teneur en chitine des espèces d'insectes élevées comme nourriture pour les insectivores, et a constaté qu'elle variait de 2,7 mg à 49,8 mg par kg (frais) et de 11,6 mg à 137,2 mg par kg (matière sèche) (110). Une autre étude a déterminé la teneur en éléments nutritifs de la poudre de grillon séchée et torréfiée : le total des fibres alimentaires a été estimé à 2,12 grammes pour 25 grammes de poudre de grillon, dont environ 87% sont composés de fibres insolubles (111).

L'AJR est facilement atteint avec une alimentation équilibrée. Pour les populations ayant un régime alimentaire peu varié, les insectes peuvent être un complément important de fibre alimentaire.

II. Autres avantages indirects pour la santé

1. Taux de conversion en protéine

À mesure que la demande de viande augmente, le besoin de végétaux pour nourrir les animaux augmente de façon beaucoup plus importante. En effet, il faut une grande quantité de protéines végétales pour produire une faible quantité de protéines animales. Pimentel a calculé que pour 1 kg de protéines animales de haute qualité, le bétail doit être nourri d'environ 6 kg de protéines végétales (112). Les taux de conversion des aliments en viande (c'est-à-dire la quantité d'aliments nécessaire pour produire une augmentation de 1 kg de poids) varient considérablement en fonction de la classe de l'animal et des pratiques de production utilisées (112). En règle générale, 1 kg de poids d'animaux vivants dans un système de production américain typique nécessite la quantité suivante d'aliments : 2,5 kg pour le poulet, 5 kg pour le porc et 10 kg pour le bœuf (113). Chez les insectes le taux de conversion est meilleure, à titre exemple, la production de 1 kg de de grillons vivants nécessite seulement 1,7 kg de nourriture (114). Lorsque ces chiffres sont ajustés pour le poids comestible

(généralement, l'animal entier ne peut pas être mangé), l'avantage de manger des insectes devient encore plus grand (9). Nakagaki a estimé que jusqu'à 80% d'un grillon est comestible et digestible, contre 55% pour le poulet et les porcs et 40% pour les bovins. Cela signifie que les grillons sont deux fois plus efficaces pour convertir les aliments pour animaux en viande que le poulet, au moins quatre fois plus efficaces que les porcs et 12 fois plus que les bovins (figure 22) (115).

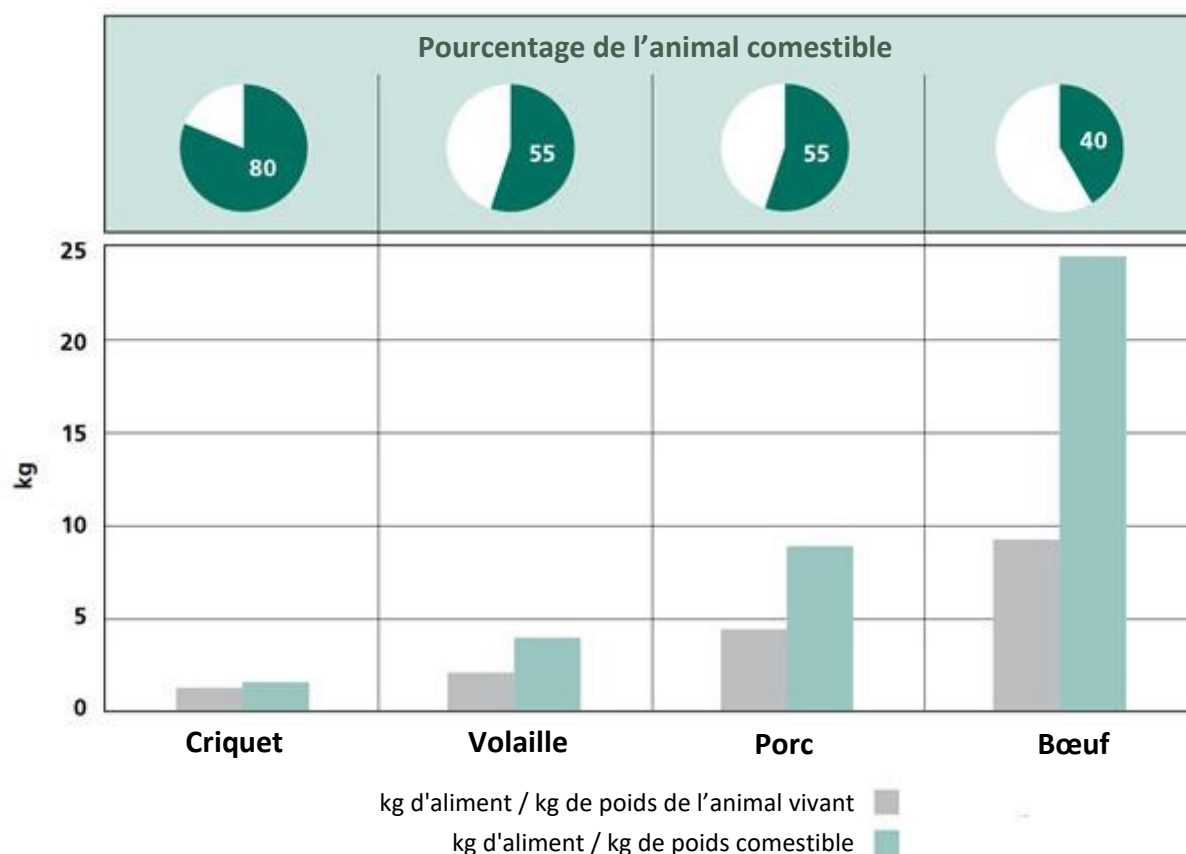


Figure 22 : Conversion en aliment du criquet, des volailles, du porc et du bœuf (1).

De plus et en raison de leur composition nutritionnelle, de leur accessibilité, de la simplicité de leurs techniques d'élevage et de leur taux de croissance rapide, les insectes peuvent constituer une solution peu coûteuse et efficace pour lutter contre l'insécurité alimentaire en fournissant une nourriture d'urgence et en améliorant les moyens de subsistance et la qualité des régimes traditionnels des personnes vulnérables rurales.

2. Sécurité alimentaire

La nutrition est essentielle pour la santé, particulièrement dans les premières années de vie lorsque les besoins nutritionnels diffèrent de ceux des adultes. Vers l'âge de 6 mois, pendant la période où l'allaitement doit être complété par d'autres aliments, les enfants des zones défavorisées ont des difficultés à recevoir une nutrition adéquate (116). De nombreux

enfants sous-alimentés au cours de leur première année de vie présentent des défauts de croissance (117). Au Kenya, 35% des enfants de moins de 5 ans ont un retard de croissance et 16% souffrent d'insuffisance pondérale. Ces problèmes récurrents sont causés par la combinaison d'une nutrition inadéquate et de maladies (116).

Dans le bassin amazonien, au moins 32 groupes amérindiens utilisent des invertébrés terrestres comme nourriture (118). La consommation d'invertébrés fournit des quantités importantes de protéines animales, en particulier pendant les périodes de soudure où le poisson et le gibier sont rares. Les Guajibo, par exemple, qui vivent à la frontière de la savane (Venezuela) dépendent principalement des insectes, en particulier des sauterelles et des larves du charançon du palmier *Rhynchophorus palmarum*. Pendant la saison des pluies (de juillet à août), plus de 60% de leurs protéines animales proviennent d'insectes. En sélectionnant ces invertébrés, les Amérindiens choisissent leur nourriture carnée dans les réseaux trophiques de la forêt tropicale qui constituent le plus grand stock renouvelable de nutriments facilement disponibles. La consommation d'invertébrés par les populations forestières comme moyen d'acquérir des protéines, des graisses et des vitamines offre une nouvelle perspective pour le développement d'une production alimentaire animale durable (1).

Une étude du milieu du XXe siècle dans le sud-ouest de la République démocratique du Congo a révélé que les protéines étaient obtenues via des grillons et des sauterelles pendant la saison sèche et en grande partie à partir de chenilles pendant la saison des pluies. La production estimée de chenilles séchées dans le district de Kwango entre 1954 et 1958 était de près de 300 tonnes par an. De plus, dans six provinces de la République démocratique du Congo, les insectes constituaient en moyenne 10% des protéines animales dans les régimes alimentaires quotidiens (jusqu'à 15 à 22% dans les provinces de l'Ouest), le poisson et la viande de gibier étant les deux principales sources de protéines, respectivement à 47% et 30% (1). Plus récemment, il a été constaté que dans la ville de Kananga, dans le sud-ouest du pays, 28% des habitants mangeaient des insectes, principalement des termites, des chenilles et des larves de coléoptères, à raison de 2,4 kg en moyenne d'insectes par mois par habitant (13). Cependant, seules les larves de coléoptères et les termites soldats (20% des espèces d'insectes comestibles) étaient disponibles sur les marchés tout au long de l'année, tandis que les autres espèces, en particulier les chenilles et les termites volantes, n'étaient disponibles que de façon saisonnière (décembre à avril). Alors que l'importance de la diversité alimentaire devient de plus en plus reconnue, davantage de recherches doivent être orientées vers la consommation et la composition d'une grande variété d'aliments, y compris des insectes. Plus précisément,

des recherches sont nécessaires sur la composition nutritionnelle des insectes sauvages et sur la diversité alimentaire en général. Les données doivent être compilées dans des bases de données accessibles. À cette fin, un réseau international de données sur la diversité alimentaire a été mis en place en 2010 au sein du réseau INFOODS de la FAO (119).

3. Faible consommation en eau

L'eau est un déterminant clé de la productivité des terres. Un nombre croissant de preuves suggère qu'un manque d'eau limite déjà la production agricole dans de nombreuses régions du monde. On estime qu'en 2025, 1,8 milliard de personnes vivront dans des pays ou des régions où la pénurie d'eau sera très importante, et les deux tiers de la population mondiale seront probablement en situation de manque d'eau (120). Les demandes croissantes imposées à l'approvisionnement mondial en eau menacent la biodiversité, la production alimentaire et d'autres besoins humains vitaux. L'agriculture consomme environ 70% de l'eau douce consommée dans le monde (121). Chapagain et Hoekstra ont estimé que la production de 1 kg de protéines animales nécessite 5 à 20 fois plus d'eau que la production de 1 kg de protéines de céréales (122). Ce chiffre approche 100 fois si l'eau nécessaire à la production fourragère et céréalière est incluse dans l'équation (121). Les mêmes auteurs ont décrit ce concept comme de l'eau virtuelle (122). Selon les auteurs, la production de 1 kg de poulet nécessite 2 300 litres d'eau virtuelle, 1 kg de porc 3 500 litres et 1 kg de bœuf 22 000 litres, les estimations pour ce dernier pouvant atteindre 43 000 litres selon le modèle d'élevage (121).

Les vers de farine, comme beaucoup d'autres insectes, ont des besoins en eau très inférieurs à ceux des bovins. Un autre intérêt des insectes réside dans leur très grande efficacité à transformer la phytomasse en biomasse animale riche en protéines, et dans leur fécondité élevée, leurs taux de croissance très rapides, ainsi que leur capacité à absorber toute l'eau dont ils ont besoin uniquement dans leur nourriture (123,124). Les vers de farine n'ont pas besoin d'eau potable supplémentaire s'ils sont élevés dans des conditions optimales : taux humidité appropriés et alimentation constitué d'un rapport son / grains approprié et de légumes tels que les carottes (125). L'empreinte hydrique d'un élevage d'insectes provient donc en très grande partie de son alimentation. Cette économie d'eau augmente l'efficacité du taux de conversion des protéines des vers de farine comparé à celui des autres animaux d'élevage traditionnels (Tableau VI).

Tableau VI : Teneur en protéine et consommation en eau par quantité de matière ou de protéine comestible produite pour différent animaux (126). Les vers de farines utilisés sont : *Tenebrio molitor* et *Zophobas morio*

Animal	Vers de farine	Porcs	Poulets	Bovins
Empreinte hydrique par quantité comestible (L / kg)	4 341	3 831	3 364	7 477
Teneur en protéines (g / kg comestible)	186	105	127	138
Consommation en eau par quantité de protéine comestible (L / g de protéines produites)	23	57	34	112

Risques

La sécurité alimentaire revêt une importance particulière pour les nouvelles sources de nourriture. Dans le contexte des insectes comestibles, il existe quatre risques majeurs pour la sécurité des aliments :

- Les consommateurs peuvent développer une réaction allergique à l'insecte.
- L'insecte peut être porteur d'agents pathogènes humains.
- L'insecte lui-même peut être toxique (risque intrinsèque).
- L'insecte peut être porteur de substances toxiques (risque extrinsèque).

I. Risques allergiques

La FAO et l'OMS, en 2001, définissent les réactions allergiques alimentaires comme « *des réactions indésirables à un aliment ou à un composant alimentaire par ailleurs inoffensif qui impliquent une réponse anormale du système immunitaire de l'organisme à une ou plusieurs protéines spécifiques des aliments* ».

Comme la plupart des aliments contenant des protéines, les arthropodes peuvent provoquer des réactions allergiques (à médiation par l'immunoglobuline E (IgE)) chez les humains sensibilisés (127). Certaines allergies (sévères) imputées aux insectes sont bien connues comme le cas des allergènes des cafards ou blattes et des allergènes des venins d'hyménoptères (abeilles, guêpes, frelons). Bien que le sujet soit mal documenté, d'autres allergies commencent à être décrites. Plusieurs cas d'allergies respiratoires ont été rapportés chez les personnels affectés à l'entretien des élevages d'insectes (11). Il s'agit essentiellement de troubles respiratoires (asthme, toux, dyspnée, rhinites, bronchites) mais également de manifestations cutanées (urticaire, démangeaisons, prurit). Ces réactions allergiques sont attribuées à des aéroallergènes et à des allergènes de contact (1). D'autres allergies professionnelles ont été identifiées chez des agriculteurs en contact avec plusieurs espèces de criquets et des boulangers en contact avec le ver de farine (128,129).

Il paraît donc légitime de s'interroger sur l'allergénicité potentielle des insectes comestibles que ce soit par des allergènes responsables d'une sensibilité spécifique ou des pan-allergènes (protéines ubiquitaires, de structures conservées communes à des organismes de groupes taxonomiques différents (130)) dans la mesure où les insectes appartiennent à l'embranchement des arthropodes et possèdent des allergènes croisant avec ceux d'autres groupes d'arthropodes comme les arachnides et les crustacés.

Dans la suite, les allergènes majeurs seront détaillés.

1. Allergènes responsables d'une sensibilisation spécifique

D'autres allergènes, plus spécifiques des insectes, pourraient également déclencher des réactions allergiques. Ces allergènes restent encore très mal connus et demandent à être identifiés et caractérisés (11).

a. Additif alimentaire E120

Le colorant carmin et l'extrait de cochenille sont des colorants rouges dérivés des corps séchés du *Dactylopius coccus* colonisant le figuier de Barbarie. Ils sont largement utilisés comme colorants pour les aliments, les médicaments, les cosmétiques et les textiles (131). L'acide carminique seul, ou lié à une protéine a été identifié comme déclencheurs probables de réactions anaphylactiques (132). Le colorant carmin a été caractérisé pour déclencher de graves réactions allergiques aux aliments (75).

Il est rapporté dans la littérature cinq cas de réaction anaphylactique au carmin (cochenille, E120). Un patient non atopique a également montré une grande quantité d'IgE sériques contre le conjugué acide carmin-albumine. En raison de son utilisation répandue dans l'industrie alimentaire et cosmétique, le carmin doit être testé dans le bilan allergique en cas de réactions après consommation (133).

b. Pollen

Certaines larves d'hyménoptères telles que les abeilles sont consommées. Elles peuvent être en contact avec du pollen et en retenir des particules. Leur consommation est déconseillée aux personnes allergiques au pollen (134).

2. Allergènes croisés et réactivités croisées

Les insectes font parties du groupe des arthropodes et partagent donc certaines de leurs protéines qui peuvent représenter un risque pour des sujets allergiques aux crustacés, aux acariens ou aux mollusques. Divers pan-allergènes tels que la tropomyosine ou l'arginine-kinase, communs aux insectes, aux crustacés, aux acariens, aux mollusques et aux nématodes, s'avèrent être responsables de réactions croisées entre ces organismes d'origines différentes (11).

a. Chitine

La chitine est le deuxième polysaccharide le plus abondant au monde. C'est un matériau résistant et souple. Pour ces propriétés, elle a un rôle structural essentielle dans de

nombreuse espèce animal ou fongique. On la retrouve notamment chez les arthropodes où elle constitue en partie la cuticule des insectes et la carapace des crustacés (135).

Bien que les activités antivirales et antitumorales de la chitine et de ses dérivés comme le chitosane soient connues depuis quelques décennies, les effets immunologiques de la chitine n'ont été reconnus que récemment. Des études récentes ont montré que la chitine a des effets complexes sur les réponses immunitaires innées et adaptatives. Dans plusieurs études, il a été suggéré que la chitine est un allergène. Cependant, la chitine et son dérivé, le chitosane (produit par désacétylation de la chitine), plutôt que d'agir comme allergènes, se sont révélés avoir des propriétés qui pourraient améliorer la réponse immunitaire de groupes spécifiques de personnes (136,137). Un examen de la réponse immunologique à la chitine et de son rôle possible dans l'induction de l'asthme et des allergies a révélé que les réponses semblaient dépendre de la taille des particules de la chitine; en d'autres termes, les particules de chitine de taille moyenne induisent une inflammation allergique, tandis que les particules de petite taille peuvent avoir l'effet inverse de réduire la réponse inflammatoire (13).

Chez l'humain, la chitine active certaines cellules immunitaires innées (éosinophiles, macrophages) et adaptatives (lymphocytes T helper de type 2). Elle induit la production de cytokines, le recrutement des leucocytes et l'activation des macrophages. La chitine structurale présente dans les micro-organismes est activement dégradée par les chitinases de l'hôte, y compris celles des mammifères, en fragments plus petits qui peuvent être détectés par les récepteurs des mammifères tels que FIBCD1, NKR-P1 et RegIIIc. La reconnaissance immunitaire de la chitine implique également d'autres récepteurs, principalement via TLR-2 et Dectin-1. Cette reconnaissance active les cellules immunitaires induisant la production de cytokines et la création d'un réseau immunitaire qui entraîne des réponses inflammatoires et allergiques (136,139).

Hypothèse du partenariat de la FAO et l'Université & Centre de Recherche de Wageningen (WUR)

Le partenariat FAO-WUR propose une hypothèse (*hygiene-hypothesis*) indiquant que la forte prévalence des allergies dans les populations occidentales est induite par un manque d'exposition aux agents pathogènes, y compris les parasites intestinaux, et à l'augmentation des pratiques de vaccination pendant l'enfance. La plupart des parasites contiennent de la chitine. L'hypothèse est que la variation de l'exposition à la chitine et aux parasites intestinaux pourrait être un élément clé pour expliquer la prévalence asymétrique des allergies dans les populations. La présence de chitinases dans le suc gastrique humain serait due à des réponses à des infections parasitaires et diminuerait l'allergie à la chitine (14).

Dans l'hypothèse d'une consommation accrue de chitine par la promotion des insectes comme aliments les conséquences pour la pathogenèse de l'asthme et des allergies sont imprévisibles. Cependant, si les allergies sont catalysées par un manque d'exposition aux substances chitineuses dans l'enfance, comme suggéré, l'augmentation de la consommation d'insectes dans la petite enfance pourrait, par extension, favoriser une meilleure protection contre les allergies plus tard dans la vie (14).

b. Tropomyosine

La tropomyosine est une protéine impliquée dans la contraction musculaire et liée au complexe actine-myosine. Cette protéine fibreuse de structure simple est présente dans de nombreuses cellules. Elle est constituée de deux chaînes protéiques de structure hélicoïdale (hélice à droite) associées en dimères (figure 23).

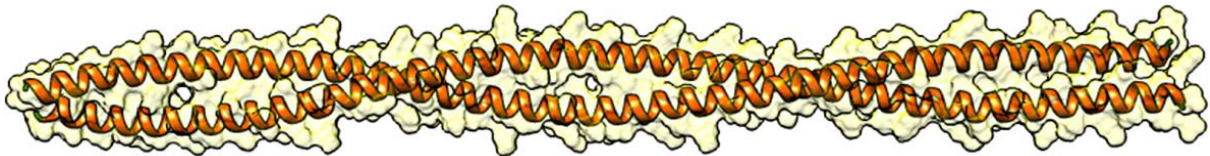


Figure 23 : Modèle moléculaire en double hélice à droite, construit par homologie pour la tropomyosine du ver à soie, *Bombyx mori* (11).

Cette protéine est considérée comme non allergénique entre vertébré, cependant la tropomyosine des invertébrés est un allergène important chez les vertébrés. Elle est présente chez l'ensemble des invertébrés (arachnides, insectes, crustacés, mollusques, nématodes), elle est donc considérée comme un pan-allergène responsable de réactions croisées entre des arthropodes et des invertébrés appartenant à des groupes différents. Chez les acariens, la tropomyosine est l'allergène majeur. Barre A. a expliqué cette réactivité croisée des tropomyosines d'origines différentes, par un degré de conservation très élevé (60 % d'identité et 80 % d'homologie, en moyenne) de leurs séquences d'acides aminés (figure 24), mais aussi surtout de leurs structures tridimensionnelles. Elles partagent des régions épitopiques communes reconnues par les IgE correspondantes (11).

```

1      10      20      30      40      50      60
Blag7  KKIQQIENDLDOHMEOLMGNKLDKDKKALONAESEVAALNRRIQLEEDLERSEERLA
Penm1  KRMQQIENDLDQVQESLLKANIICLVKDKKALSNAGEVAALNRRIQLEEDLERSEERLN
Derp10 KKIQQIENELDQVQEQISANIKLEEKKALQTAEGDVAALNRRIQLEEDLERSEERLK
Bombyx KKLAAQVEEDLILNKNKLEQANKDLEEKKOLTAIEAIVAALNRKVQIIEEDLEKSEERSG

70     80     90     100    110    120
Blag7  TATAKLAEASQAADSESERARKILLESKGLADEERMDALENQLKEARFMABEADKKYDEVAR
Penm1  TATIKLAEASQAADSESERMRKVLENRSLSDDEERMDALENQLKEARFLAEEADRKYDEVAR
Derp10 TATAKLEASQAADSESERMRKMLEHRSITDEERMEGLEENQLKEARVMAEADRKYDEVAR
Bombyx TAQCKLLEAQQSADENNRMCQVLENRAQQDEERMDQLTNQLKEARLTAEDADGKSEDEVSF

130    140    150    160    170    180
Blag7  KLAMVEADLERAEERAETGESKIVELEEEELRVVGNLKSLEVSEEKANLREEEYKQOIKT
Penm1  KLAMVEADLERAEERAETGESKIVELEEEELRVVGNLKSLEVSEEKANOREEAYKEQIKT
Derp10 KLAMVEADLERAEERAETGESKIVELEEEELRVVGNLKSLEVSEEKACQREEEAHEQQIRI
Bombyx KLAIVEDELEVAEDRVKSGDAKISELEEEELRVVGNLKSLEVSEEKANQRVVEEKKQIKT

190    200    210    220    230    237
Blag7  LNTIRLKEAEARAEFAERSVQKLQKEVDRLEDELVHEKEKYKVTODDLDMTFTELIGN
Penm1  LTNKLAEEARAEFAERSVQKLQKEVDRLEDELVNEKEKYKSTIDELDQTFSELISGY
Derp10 MTTKLAEEARAEFAERSVQKLQKEVDRLEDELVHEKEKYKSTIDELDQTFAEITGY
Bombyx LTKLKEAEARAEVAKTVKKLQKEVDRLEDELGINKDRYKSLADEMDSTFAELAGY

```

Figure 24 : Alignement des séquences de la tropomyosine du ver à soie *Bombyx mori* (*Bombyx*) avec les tropomyosines de la blatte européenne *Blattella germanica* (*Blag7*), de la crevette tigrée *Penaeus monodon* (*Penm1*) et de l'acarien *Dermatophagoides pteronyssinus* (*Derp10*). Les acides aminés identiques sont en lettres blanches sur fond noir et les acides aminés homologues en lettres noires sur fond gris (11).

Cet ensemble de séquence et de structure pourrait être à l'origine de réactions croisées entre les tropomyosines des insectes comestibles et les allergènes de même nature présents dans d'autres espèces d'arthropodes. On peut craindre que des individus allergiques à la tropomyosine des crustacés, crevettes ou crabes par exemple, ou des acariens, réagissent après consommation d'insectes comestibles dont les tropomyosines sont très voisines de celles des crevettes, des crabes ou des acariens (2). Cependant dans une étude récente, il a été démontré que la tropomyosine joue un rôle mineur dans la réactivité croisée chez les insectes comestibles (141).

c. Arginine kinase

L'arginine kinase est une transférase qui catalyse la phosphorylation de l'arginine et de la proline en présence d'ATP. L'enzyme présente deux domaines : un domaine formé d'un large feuillet β central entouré d'hélices α associé à un domaine constitué uniquement d'hélices α (figure 25).

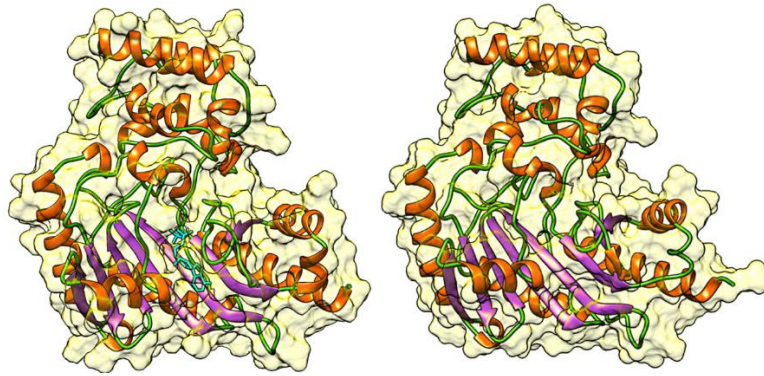


Figure 25 : Gauche : Modèle tridimensionnel construit par homologie pour l'arginine kinase du ver à soie, *Bombyx mori*. L'ATP, qui intervient comme donneur de phosphate dans le processus de phosphorylation du substrat catalysé par l'enzyme est représenté en bleu cyan. Droite : Modèle tridimensionnel construit par homologie pour l'arginine kinase du crabe, *Scylla paramarmosain* (11).

L'arginine kinase est un allergène très répandu chez les invertébrés, en particulier chez les crustacés et les insectes (142). Les arginines kinases appartenant aux différents groupes, montrent des identités (70 % en moyenne) et des homologies (90 % en moyenne) de séquences importantes (cf. l'alignement de séquences de la figure 26). Ces homologies de séquences vont de pair avec une forte homologie de structure, ce qui suggère des possibilités de réactivité croisée entre ces protéines. Des réactions/allergies croisées sont tout à fait possibles entre les insectes comestibles et d'autres invertébrés (crabes, crevettes, acariens), par le biais de cette enzyme (11).

	1	10	20	30	40	50
Bombm1	KLEAGF	SKLQSS	-DSKSL	LKKYL	TREVF	SLKNK
Blag9	KLEAGF	AKLAAS	-DSKSL	LKKYL	TREVF	DLNKK
Penm2	KLEAGF	KLEAATD	CKSL	LKKYL	SKAVF	DQLK
Derp20	KLEAGF	KLQNAQ	CHSL	LKKYL	TRDVF	DQLN
	60	70	80	90	100	110
Bombm1	YAPDAE	SYVFAE	LFDPI	I	EDYH	NGFK
Blag9	YAPDAE	YTVFAD	LFDPI	I	EDYH	CGFK
Penm2	YAPDAE	YTVFAD	LFDPI	I	EDYH	VGFK
Derp20	YAPDAE	SYVFAE	LFDPI	I	EDYH	NGFK
	120	130	140	150	160	170
Bombm1	GRSLE	GYPFN	PCLTE	SAQY	KEMED	KVSGT
Blag9	GRSMG	GYPFN	PCLTE	SAQY	KEMED	KVSS
Penm2	GRSMG	GYPFN	PCLTE	SAQY	KEMED	KVSS
Derp20	GRSLN	GYPFN	PCLTE	SAQY	KEMED	KVSGT
	180	190	200	210	220	230
Bombm1	FKEGDR	FLQAA	NACRF	WPTGR	GIYHN	ENKTF
Blag9	FKEGDR	FLQAA	NACRF	WPTGR	GIYHN	DAKTF
Penm2	FKEGDR	FLQAA	NACRY	WPTGR	GIYHN	DNKTF
Derp20	FKEGDR	FLQAA	NACRY	WPTGR	GIYHN	DKKTF
	240	250	260	270	280	290
Bombm1	SAVNE	IEKRI	PFSSH	DRLG	FLTF	CPNL
Blag9	SAVND	IEKRI	PFSSH	DRLG	FLTF	CPNL
Penm2	SAVNE	IEKRI	PFSSH	DRLG	FLTF	CPNL
Derp20	SAVNE	IEKRI	PFSSH	DRLG	FLTF	CPNL
	300	310	320	330	340	347
Bombm1	VRGTR	GEHTE	AE	GGVY	DISN	KRRM
Blag9	VRGTR	GEHTE	AE	GGVY	DISN	KRRM
Penm2	VRGTR	GEHTE	AE	GGVY	DISN	KRRM
Derp20	VRGTR	GEHTE	AE	GGVY	DISN	KRRM

Figure 26 : Alignement de la séquence de l'arginine kinase du ver à soie *Bombyx mori* (Bombm1) avec les arginines kinases de la blatte européenne *Blattella germanica* (Blag9), de la crevette tigrée *Penaeus monodon* (Penm2), et de l'acarien *Dermatophagoides pteronyssinus* (Derp20). Les acides aminés identiques sont en lettres blanches sur fond noir et les acides aminés homologues en lettres noires sur fond gris (11).

L'arginine kinase a été signalée comme allergène alimentaire dans les crustacés tels que la crevette tigrée noire (*Penaeus monodon*) et la crevette blanche du Pacifique (*Litopenaeus vannamei*) et chez les espèces d'insectes tels que le pyrale indienne des fruits secs (*Plodia interpunctella*), la blatte d'Amérique (*Periplaneta americana*), la blatte allemande (*Blattella germanica*) et le ver à soie (*Bombix mori*) (141).

Dans une étude récente, Broekman et ses collègues ont sélectionné 60 patients allergiques aux crevettes qui n'ont jamais consommé de protéines de vers de farine. Le test d'allergie ImmunoCAP lié à l'arginine kinase du *Tenebrio Molitor* a été positif chez 10 patients (143). Une autre étude n'a pas observé de réactivité croisée entre les arginines kinases issu d'*Acheta domesticus* et de *Tenebrio molitor*. Ils concluent par cette observation que la réactivité croisée n'est pas systématique (144). Il a été rapporté que plus de 1 000 patients par an souffrent de réactions anaphylactiques suite à la consommation du ver à soie, et plus particulièrement de son arginine kinase (145).

d. Autres allergènes

D'autres pan-allergènes communs aux arthropodes existent chez les insectes comestibles. Certaines molécules dépassent même le cadre des arthropodes, puisqu'on les rencontre également chez les végétaux : la g-thionines des céréales et la protéines défensinlike de l'armoise (*Artemisia vulgaris*) et de l'ambrosie (*Ambrosia artemisifolia*) (146). Enfin, les chaînes glycaniques, N-glycanes essentiellement, liées aux allergènes sous forme de CCD (Complex Carbohydrate Determinants) ont été également incriminées dans les réactivités croisées, mais leur implication clinique reste apparemment négligeable (147).

Cependant, dans l'ensemble, les allergènes des insectes restent mal connus, et leur étude devra accompagner le développement de l'entomophagie.

II. Risque microbiologique

Les insectes peuvent être porteurs de micro-organismes associés qui peuvent contaminer les aliments qui en seront issus. Les insectes collectés dans la nature et ceux élevés dans les exploitations agricoles peuvent être infectés par des micro-organismes pathogènes, notamment des bactéries, des virus, des champignons et des parasites. L'évaluation des risques biologiques affectant potentiellement les insectes pour la consommation humaine souffre du manque de données (148).

Une attention particulière devra être accordée aux agents pathogènes qui ont initialement des animaux comme hôtes, mais qui peuvent se déplacer vers les humains comme hôtes préférentiels. Certaines maladies bien connues (par exemple les maladies liées au virus de l'immunodéficience humaine ou VIH) ont été introduites par les animaux de cette manière. La transmission des agents pathogènes se produit d'abord par l'adaptation des agents pathogènes à la nouvelle population hôte et ensuite par sa propagation à l'intérieur de cette population. L'adaptation du pathogène au nouvel hôte dépend de la différence génétique entre les deux espèces et de la nature du pathogène lui-même (149). Les insectes sont taxonomiquement beaucoup plus éloignés de l'humain que les vertébrés. Le risque d'infections zoonotiques devrait donc être faible. Néanmoins, les insectes sont des vecteurs potentiels d'agents pathogènes, notamment les œufs d'helminthes gastro-intestinaux retrouvés dans les fèces humaines. Le risque d'infections zoonotiques pourrait augmenter avec l'utilisation imprudente des déchets, la manipulation non hygiénique des insectes et le contact direct entre les insectes d'élevage et les insectes sauvages (1).

1. Bactéries

La flore intestinale des insectes est constituée d'une grande diversité de micro-organismes. Des spores de divers micro-organismes peuvent être présentes sur les cuticules d'insectes, y compris des micro-organismes qui vivent de manière saprotrophe (qui se nourrit de matière en décomposition) sur des produits d'insectes comestibles et peuvent même contribuer à la dégradation du produit (1). Schlüter a rapporté une analyse quantitative de la biomasse microbienne dans l'intestin d'insectes comestibles. Il a rapporté que la densité bactérienne moyenne était de 6 à 12 log bactéries/mL de contenu intestinal (le volume du tractus intestinal de l'insecte est de 0,05 à 2 mL), avec une biomasse microbienne totale de 1 à 10% du corps total de l'insecte, selon l'espèce (150).

Dans la plupart des pays tropicaux, les insectes sont consommés entiers, y compris leur microflore intestinale. Une exception est la chenille mopane, qui est déstructurée (vidée de son estomac en exerçant une pression sur le corps avec deux doigts), ou privée de nourriture pendant un ou deux jours avant la consommation (1).

L'importance d'une manipulation hygiénique et d'un stockage correct a été soulignée par Klunder et ses collaborateurs dans une autre étude de laboratoire portant sur le contenu microbiologique des larves de vers de farine jaunes d'élevage (*Tenebrio molitor*) et des grillons domestiques (*Acheta domesticus*). Faire bouillir les insectes dans l'eau pendant quelques minutes a éliminé les entérobactéries, mais les spores ont survécu à ce processus, avec le

risque d'une germination potentielle et d'un développement des bactéries dès que les conditions sont favorables : température autour de 30°C et environnement humide (151). Les bactéries sporulées ont été trouvées dans l'intestin et sur la peau des insectes et sont probablement d'origine tellurique. Les techniques de conservation alternatives qui n'impliquent pas l'utilisation du froid sont le séchage et l'acidification. Dans cette étude, ni *Salmonella* ni *Listeria monocytogenes* n'ont été identifiées dans les échantillons analysés et il a été conclu qu'il est peu probable que ces insectes attirent la flore microbienne qui présente des risques pour l'être humain. Cependant, d'autres études ont révélé leur présence. Il est donc recommandé que les insectes subissent une transformation pour les rendre inactifs ou réduire leur contenu microbien. La cuisson (ébullition ou rôtissage) ou la pasteurisation seraient une réponse adaptée. Néanmoins, la méta-étude montrant que certains insectes, même après traitement, pouvait encore contenir des pathogènes critiques tels que certaines salmonelles, listerias, *clostridium*s spp. ou même *Echerichia Coli* (152), il est nécessaire d'appliquer les mêmes vérifications bactériologiques que pour tout autre aliment issu de l'industrie agro-alimentaire.

A l'inverse d'un danger microbien potentiel, certains insectes comestibles sont connus pour contenir des peptides antibactériens. Par exemple, le peptide Hf-1 provenant des larves de la mouche domestique (*Musca domestica*) s'est révélé inhiber les souches d'agents pathogènes alimentaires tels que *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhimurium*, *Shigella dysenteriae*, *Staphylococcus aureus* et *Bacillus subtilis*. La présence de Hf-1 suggère que l'insecte a un potentiel de conservation (153).

a. Approche globale de la contamination bactérienne

Les insectes comestibles crus contiennent généralement un nombre élevé d'aérobies mésophiles, d'endospores bactériennes, de bactéries sporulantes, d'entérobactéries, de bactéries lactiques et d'aérobies psychrotrophes. Plusieurs études se sont concentrées sur la réduction de la contamination microbienne des insectes comestibles par l'application de traitements tels que la diète, le rinçage, les traitements thermiques, le refroidissement, le séchage et la marinade, seuls et parfois en combinaison. Bien que ces études montrent que les traitements thermiques étaient les méthodes les plus efficaces pour réduire la charge microbienne, ils soulignent également la nécessité de stratégies d'atténuation spécifiques aux espèces (152). Inversement, transformés (c'est-à-dire séché et traités thermiquement) les insectes comestibles présentaient généralement une composition plus faible en bactéries que les insectes frais, ce qui confirme l'efficacité de certains traitements pour réduire la contamination microbienne de ces aliments.

Une méta-étude Italienne dirigé par Garofalo a analysé 55 documents décrivant la composition bactérienne de différents insectes comestibles en fonction des méthodes de préparation (fris, frais, cuit, bouillie, etc.). Les résultats complets sont disponibles en annexe I. Les résultats de cette étude montrent que les insectes comestibles frais contiennent des charges microbiennes élevées, y compris les aérobies mésophiles totaux (3,6 à 9,4 log ufc/g), entérobactéries (4,2 à 7,8 log ufc/g), endospores bactériennes ou bactéries sporulantes (0,5 à 5,4 log ufc/g), bactéries lactiques (5,2 à 9,1 log ufc/g), aérobies psychrotrophes (6,0 à 7,6 log ufc/g), et levures et moisissures (1,4 à 7,2 log ufc/g) (figure 27) (152).

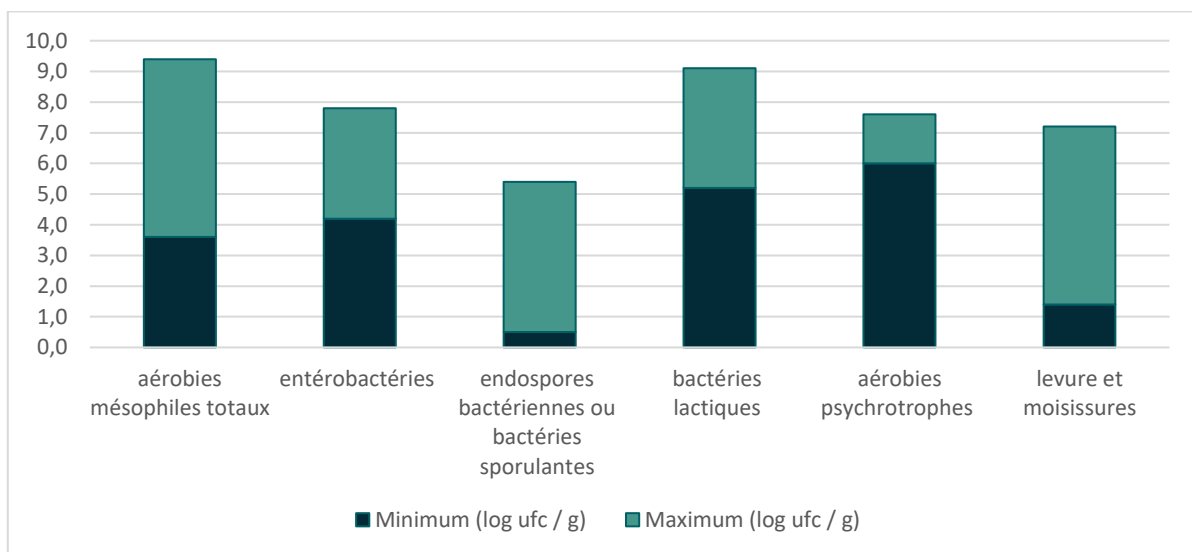


Figure 27 : Quantités minimum et maximum de bactéries et levures potentiellement pathogènes pour l'humain retrouvées dans différents insectes comestibles frais en logarithme d'unité formant colonies par gramme d'insecte (152).

Les agents pathogènes d'origine alimentaire sont un paramètre important de sécurité alimentaire, tandis que les aérobies mésophiles totaux, coliformes et entérobactéries sont des indicateurs d'hygiène (154). Par conséquent, des informations quantitatives sur ces groupes microbiens sont nécessaires pour vérifier l'efficacité d'une étape de transformation ou pour confirmer la nécessité d'améliorer les procédures d'hygiène ainsi que de s'assurer d'une révision globale des programmes de gestion de la qualité dans l'industrie alimentaire (154).

i. Aérobies mésophiles totaux

Le dénombrement des aérobies mésophiles totaux fournit des informations sur la charge microbienne globale d'un échantillon alimentaire. Il indique en général la contamination et la qualité microbienne de l'échantillon. Il peut aussi être utilisé pour prédire la durée de conservation des produits à température ambiante (154). L'organisme de régulation européen (EFSA) n'a pas établi de critères spécifiques d'hygiène microbiologique chez les insectes ou les produits à base d'insectes vendus pour la consommation humaine, bien que l'Autorité de sécurité des produits alimentaires et de consommation des Pays-Bas ait

proposé un seuil de 6 log ufc/g pour les aérobies mésophiles totaux dans les insectes lyophilisés (155). Le Conseil Supérieur de la Santé (156) et l'agence fédérale pour la sécurité de la chaîne alimentaire (157) ont proposé d'utiliser les mêmes critères d'hygiène du procédé concernant la viande hachée décrit dans le règlement UE n° 1441/2007, qui impose, pour les aérobies mésophiles totaux une limite de 5,7 log ufc/g (157–159).

ii. Entérobactéries

Les entérobactéries sont une famille de bactéries gram positif à catalase et oxydase négatives présentes dans les intestins des vertébrés. Leur présence dans les aliments est donc souvent associée à une contamination fécale. Les entérobactéries sont souvent détectées dans le microbiote d'insectes comestibles, indiquant que les insectes ne sont pas élevés, manipulés et / ou traités dans des conditions d'hygiène adéquates (160,161). Certaines espèces d'entérobactéries sont pathogènes ou opportunistes des humains. Les entérobactéries pourraient également réduire la durée de conservation des insectes comestibles (158,161). En général, une étape de chauffage, telle que l'ébullition, est suffisante pour éliminer ou au moins réduire sensiblement le nombre de bactéries. Un seuil de 3 log ufc/g pour les entérobactéries, a été recommandé par l'EFSA pour les insectes comestibles (152). Il est identique au seuil retenu pour les matières premières utilisées dans la préparation de la viande.

iii. Bactéries sporulantes

Les bactéries sporulantes peuvent inclure des espèces pathogènes, telles que *Clostridium botulinum*, *Clostridium perfringens* et *Bacillus cereus*. Les spores qu'elles forment sont généralement associées au sol et à la poussière, et leur présence dans les aliments représente un problème sérieux car elles peuvent produire des endospores résistantes à la chaleur, à la déshydratation, aux radiations et traitements chimiques donc difficiles à éliminer. De plus, si la nourriture est incorrectement cuite, refroidie et stockée, les spores peuvent germer et se multiplier (162). Les insectes comestibles peuvent être contaminés par des bactéries sporulantes dérivées d'endospores associées au sol, à la poussière ou aux légumes utilisés comme aliments des insectes (28,29).

Certains genres de bactérie, connus pour être des pathogènes d'origine alimentaire, devront faire l'objet d'attentions particulières.

b. Le genre *Cronobacter*

Cronobacter sakazakii est une bactérie pathogène du genre *Cronobacter spp.*; elle intervient pour une part importante dans les cas de mortalité des nouveau-nés (162). Plusieurs espèces du genre *Cronobacter* ont été isolées dans des aliments :

- Produits secs (préparations en poudre pour nourrissons, lait écrémé, herbes, noix et épices),
- Laits, fromages, légumes et viandes,

Elles sont présentes dans l'environnement, tels que les sols , l'eau et la poussière, ainsi que chez les rongeurs et les insectes (162).

Les insectes en poudre ont une consistance et des caractéristiques physico-chimiques similaires à celles des préparations en poudre pour nourrissons, notamment des aliments enrichis, tels que du porridge à base de farine d'insecte pour les nourrissons dénutris (162). Le risque de contamination par *Cronobacter sakazakii* dans ce type de produit doit être particulièrement contrôlé.

c. Le genre *Bacillus*

Bacillus spp. sont des bactéries sporulantes que l'on trouve fréquemment, parfois à des niveaux élevés, dans les insectes comestibles frais et transformés (151,157). Le groupe *Bacillus cereus* comprend les espèces suivantes, *B. anthracis*, *B. cereus* stricto sensu, *Bacillus cytotoxicus*, *Bacillus mycoides*, *Bacillus pseudomycoides* et *Bacillus thuringiensis*. Fasolato et ses collaborateurs ont mené une étude spécifiquement axée sur l'identification des bactéries du groupe *B. cereus* isolés à partir d'insectes comestibles transformés (vers de farine, grillons, criquets taupes et vers à soie). *B. cereus* est un pathogène d'origine alimentaire responsable d'une intoxication à des doses élevées (supérieur à 5 log ufc/g) (162). Ils ont observé une grande variabilité de la diversité des espèces bactériennes parmi le microbiote d'insectes. Variabilité qui semblait être liée aux espèces d'insectes et au processus de production, avec des nombres de *B. cereus* de 4 à 6,6 log ufc/g (157). Une autre étude a trouvé plus de 5 log ufc/g de *B. cereus* dans la poudre de grillon commercialisée (163). Les analyses phylogénétiques menées par Fasolato ont révélé trois clusters majeurs au sein du groupe *Bacillus cereus* : *B. cereus* stricto sensu, *B. thuringiensis* et *B. cytotoxicus*. *B. thuringiensis* est principalement considéré comme un microbiote commensal chez les insectes, bien que certaines souches soient pathogènes et utilisées pour lutter contre les insectes ravageurs. Il a été démontré que cette espèce n'était responsable des maladies d'origine alimentaire que

dans quelques cas, alors que *B. cytotoxicus* était corrélée à des foyers de maladies d'origine alimentaire en France en 2013 (157).

d. *Le genre Clostridium*

Les *Clostridium spp.* comprennent plusieurs espèces pathogènes, telles que *Clostridium botulinum*, *Clostridium perfringens* et *Clostridium difficile*, qui sont responsables de graves maladies humaines. Bien qu'à des niveaux faibles (inférieurs à 2 log ufc/g), des spores de *Clostridium perfringens* ont été signalés dans des grillons, des sauterelles et des vers de farine entièrement transformés (bouillis et séchés) commercialisés ainsi que dans de la poudre de grillons (161). D'après la littérature, aucune de ces autres espèces pathogènes n'a encore été spécifiquement détectée chez les insectes comestibles, bien que *Clostridium spp.* a été trouvé dans les larves fraîches de *Tenebrio molitor* (158,164), les grillons entiers, les vers de farine transformés (161) et les sauterelles *Ruspolia differens* (165). Seul *Clostridium sordellii*, qui est une espèce toxigène, a été trouvé dans des punaises d'eau géantes transformées (166), et *Clostridium thermopalmarium* a été identifié dans des grillons entiers transformés (*Acheta domesticus*), des sauterelles (*Locusta migratoria*) et des larves de ver de farine (*Tenebrio molitor*) (163).

e. *Le genre Pseudomonas*

Le genre *Pseudomonas* comprend des espèces qui colonisent plusieurs habitats, comme le sol, l'eau, les plantes et la nourriture. Les espèces de ce genre sont pathogènes pour les insectes et sont les principaux agents responsables de la détérioration des aliments riches en protéines. Des *Pseudomonas spp.* ont été largement détectées chez *Griffiniella africana*, *Rhynchophorus phoenicis*, *Imbrasia belina*, *Locusta migratoria migratorioides*, des larves de *Tenebrio molitor*, *Acheta domesticus*, *Alphitobius diaperinus*, *Ruspolia differens*, *Apis mellifera* et *Liometopum apiculatum* (152). *Pseudomonas aeruginos* est un agent pathogène humain opportuniste, et il a été détecté dans des insectes et des ravageurs comestibles, tels que les sauterelles âcres, des punaises, des papillons, des mouches et des cafards, et plus particulièrement chez *Macrotermes bellicosus*, *Gryllus bimaculatus* et chez les larves d'*Oryctes monoceros* (152).

f. *Le genre Staphylococcus*

Le genre *Staphylococcus* est très répandu parmi les insectes comestibles. *St. aureus*, un pathogène humain opportuniste, est largement répandu dans la nature et fait partie de la flore saprophyte de la peau et des muqueuses des humains et des animaux. Par conséquent,

il peut également être présent dans des insectes comestibles en raison d'une contamination d'origine humaine lors de la manipulation ou du traitement. *St aureus* est sensible au traitement thermique, mais les insectes comestibles transformés (bouillis et salés) sont favorables à la croissance de cette espèce, car elle est halophile (organisme qui s'accommode ou a besoin de fortes concentrations en sel dans son milieu pour vivre) et a la capacité de dominer en l'absence de concurrence (167). Des *Staphylococcus spp.* ont été détectés chez plusieurs espèces d'insectes comestibles, telles que les larves d'*Oryctes monoceros*, larves de *Bunaea alcinoe*, larves de *Cirina forda* (papillon de nuit de l'empereur pâle), larves de *Tenebrio molitor*, larves et adultes de *Rhynchophorus phoenicis*, *Griffiniella africana*, *Heteroligus meles*, *Acheta domesticus*, *Locusta migratoria*, *Ruspolia differens*, *Macrotermes bellicosus* et *Gryllus bimaculatus* (152). De plus, Grabowski et Klein ont signalé la présence de plusieurs *Staphylococcus spp.*, tels que *St. aureus*, *St. epidermidis*, *St. cohnii*, *St. lugdunensis*, *St. saprophyticus*, *St. warneri*, *St. haemolyticus*, *St. hominis*, *St. capitisin* dans des fourmis, des guêpes, des coléoptères, des papillons, des vers à soie, des mouches et des scorpions (168).

g. Le genre Vibrio

Le genre *Vibrio* comprend plusieurs agents pathogènes humains, tels que *Vibrio cholerae*, *Vibrio parahaemolyticus* et *Vibrio vulnificus*. Cependant, les *Vibrio spp.* ne sont pas courants dans le microbiote des insectes. Néanmoins, Osimani et ses collègues et Wynants et ses collègues ont rapporté le genre *Vibrio* dans des larves de *Tenebrio molitor* (163,169), et *Vibrio hangzhouensis* et *Vibrio diazotrophicus* ont été détectés dans des punaises d'eau géantes transformées (166).

h. Le genre Campylobacter

Le genre *Campylobacter* est associé à des infections sévères et à des maladies inflammatoires intestinales. Ssepuyya a détecté *Campylobacter rectus* et *Campylobacter concisus* dans des insectes fraîchement récoltés à l'état sauvage (165). Le genre *Campylobacter* a également été trouvé chez des mouches, tandis que *Campylobacter jejuni* a été identifié chez des coléoptères (170).

i. Le genre Salmonella

Les *Salmonella spp.* sont des entérobactéries, pathogènes majeurs de l'humains d'origine alimentaire. Ces bactéries ont été trouvées dans des larves de *Tenebrio molitor* (163), dans les larves de la teigne pâle de l'empereur (171), et dans les larves de *Rhynchophorus phoenicis* (172). Des salmonelles viables ont seulement été détectées dans des sauterelles

fraîches (5,4 log ufc/g) et des sauterelles frites (1,0 log ufc/g) (173). Selon l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, pour que le produit soit conforme, aucune salmonelle doit être détectée (174).

j. Le genre Listeria

Les *Listeria spp.* sont également des entérobactéries, pathogènes majeurs de l'humains d'origine alimentaire. *Listera monocytogenes* est la bactérie de ce genre qui pose le plus de problème de sécurité alimentaire. Aucune étude n'a détecté des *Listera monocytogenes* viables chez des insectes comestibles. Cependant, d'autres *listeria* ont été détectées, en quantité relativement faible, dans de la poudre de grillon (161) et des larves de vers de farine transformées (161). *Listeria ivanovii* a été trouvée dans des larves de *Tenebrio molitor* (168). Pour qu'un produit alimentaire soit conforme, l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail demande à ce que le taux de *Listeria monocytogenes* ne dépasse pas le seuil de 1 log ufc/g (174).

k. Gènes de résistance aux antibiotiques

La résistance aux antibiotiques (RA) est une menace importante pour la santé humaine. Des décennies d'utilisation continue et massive et d'abus d'antibiotiques à des fins thérapeutiques et non thérapeutiques dans divers domaines, tels que la médecine clinique, l'élevage de bétail, l'agriculture et l'aquaculture, ont exercé une pression sélective, entraînant une augmentation de la résistance chez les bactéries, notamment chez les pathogènes humains (175,176). L'évaluation de transférabilités de RA chez les insectes comestibles est une question de sécurité importante.

La résistance aux antibiotiques peut être disséminée par des micro-organismes dans différents supports tels que les humains, les animaux, le sol, l'eau et les aliments (175). Les chaînes alimentaires font partie des réservoirs et des voies les plus importants pour la propagation des bactéries résistantes aux antibiotiques et des gènes de RA chez l'être humain (161). Récemment, Zurek et Ghosha ont montré que les insectes pourraient représenter un réservoir important de micro-organismes résistants aux antibiotiques (177). Marshall et ses collègues ont été les premiers à évaluer la présence et la fréquence de certains déterminants de la RA chez divers insectes comestibles, y compris la poudre de grillon, les grillons entiers, les sauterelles, les larves de vers de farine, les punaises d'eau géantes, les fourmis noires, les termites, chrysalides de vers à soie et scorpions noirs (178). Tous les échantillons testés ont montré la présence de certains gènes de RA.

Par la suite, Osimani et Garofalo ont confirmé le taux élevé d'incidence de gènes qui confèrent une résistance à la tétracycline, à l'érythromycine et aux β -lactamines dans 40 échantillons de larves de sauterelles et de vers de farine en Belgique, aux Pays-Bas, en France et en Thaïlande (179,180). Ils ont mis en évidence la variabilité de la distribution des gènes de RA, qui dépendait de la répartition géographique des échantillons d'insectes, impliquant d'éventuelles différences dans l'utilisation d'antibiotiques ou des pratiques d'élevage d'insectes entre les pays. Des chercheurs ont également examiné à l'aide de la qPCR la présence de cinq des gènes de carbapénémase les plus courants (167,179). Les gènes blaNDM-1 (10%) et blaOXA-48 (3%) ont été détectés à des pourcentages très faibles dans les échantillons de larves de vers de farine, tandis que blaNDM-1 et blaOXA-48 ont été détectés à des fréquences plus élevées de respectivement 27 et 57%, dans des échantillons de sauterelles. BlaVIM a également été détecté à un faible pourcentage (7%) dans les sauterelles. Pour mieux comprendre la source des gènes de RA dans les insectes comestibles, Osimani, Milanović, Cardinali et Garofalo ont conduit en laboratoire un élevage contrôlé de larves de vers de farine. Ils ont étudié la distribution de certains gènes de RA et de microorganismes résistants aux antibiotiques. Il est intéressant de noter que malgré l'absence d'antibiotique utilisé lors de l'élevage d'insectes et dans les substrats d'alimentation, des microorganismes résistants aux antibiotiques et des gènes codant pour la résistance à la tétracycline ont été détectés dans les insectes. L'implication possible de l'aliment dans la distribution de la RA dans les vers de farine et dans la farine de blé qu'ils consomment, a été envisagée.

Une étude plus récente sur la détection des gènes de RA en utilisant la qPCR dans les vers de farine frais (*Tenebrio molitor*) et les grillons (*Acheta domesticus*) provenant d'entreprises d'élevage situées en Belgique et aux Pays-Bas a confirmé la fréquence élevée de gènes résistants à la tétracycline parmi les insectes analysés (181). L'incidence des gènes était plus élevée chez les vers de farine que chez les grillons, confirmant le rôle possible de la nourriture dans la propagation de la RA parmi les insectes comestibles. Les différences dans les profils de distribution des gènes de RA parmi les échantillons d'insectes testés pourraient être attribuées à des contamination environnementale pendant la manipulation, le traitement et le stockage. La présence des gènes de RA qui confèrent une résistance à la tétracycline, à l'érythromycine, aux β -lactamines et aux carbapénèmes suggère la nécessité d'une évaluation minutieuse de ce risque chez les insectes comestibles (152).

En conclusion, le risque d'intoxication bactériennes semble significatif mais maîtrisable dans une production respectant des bonnes pratiques d'élevage. Dans l'hypothèse du

développement d'une filière de production d'insectes comestibles, une réglementation adéquate permettra de maîtriser le risque.

2. Parasites

Les insectes comestibles sont souvent infectés par des parasites qui entraînent des pertes de production importantes. Ces agents pathogènes constituent également une menace indirecte pour les humains (12).

Une étude récente, menée par Gałęcki R et Sokół R, qui sera nommée étude Gałęcki-Sokół dans la suite de cette partie, s'est intéressée à la présence de parasites dans des différents insectes (vers de farine, blattes, criquets et grillons) issus de 300 élevages. Des formes de développement parasitaire ont été détectées dans 244 (81%) des 300 élevages d'insectes examinés. Dans 206 cas (69%), les parasites identifiés étaient pathogènes pour les insectes ; dans 106 cas (35%), ils étaient potentiellement parasites pour les animaux ; et dans 91 cas (30%), ils étaient potentiellement pathogènes pour l'humain (12). L'étude s'est focalisée sur 19 parasites potentiels de l'humain. Les données complètes sont reportées dans le tableau VII.

Tableau VII : Nombre de différents élevages d'insectes où il a été retrouvé différents parasites pathogènes pour l'humain (12).

Parasite	Elevages de vers de farine		Elevages de grillons		Elevages de blattes		Elevages de criquets	
	Absolue	Relatif	Absolue	Relatif	Absolue	Relatif	Absolue	Relatif
<i>Cryptosporidium spp.</i>	12	16%	5	6,67%	13	17,33%	4	5,33%
<i>Gregarine spp.</i>	44	58,77%	30	40%	57	76%	51	68%
<i>Isospora spp.</i>	7	9,33%	4	5,33%	9	12%	8	10,67%
<i>Balantidium spp.</i>	11	14,67%	-	-	13	17,33%	9	12%
<i>Entamoeba spp.</i>	9	12%	-	-	14	18,67%	4	5,33%
<i>Nyctotherus spp.</i>	-	-	-	-	17	22,67%	-	-
<i>Cysticercoides du ténia</i>	9	12%	3	4%	4	5,33%	3	4%
<i>Gordiidea spp.</i>	-	-	6	8%	-	-	6	8%
<i>Hammerschmidtella die signi</i>	-	-	-	-	35	46,67%	-	-
<i>Steinernema spp</i>	-	-	-	-	-	-	22	29,33%
<i>Pharyngodon spp.</i>	-	-	-	-	-	-	14	18,67%
<i>Physaloptera spp.</i>	4	5,4%	2	2,67%	9	12%	7	9,33%
<i>Spiuroidea</i>	5	6,67%	-	-	7	9,33%	-	-

<i>Thelastomidae spp.</i>	-	-	-	-	-	-	10	13,33%
<i>Thelastoma spp.</i>	-	-	-	-	58	77,33%	-	-
<i>Acanthocephala</i>	2	2,67%	-	-	3	4%	-	-
<i>Pentastomida</i>	-	-	-	-	2	2,67%	-	-
<i>Acaridés</i>	35	46,67%	-	-	15	20%	7	9,33%

Les chercheurs ont pu tirer les conclusions suivantes (12) :

- Les insectes importés d'Asie ou d'Afrique, étaient plus infectés par des parasites que ceux originaires d'Europe.
- Les élevages dont le stock était complété par des insectes provenant d'autres élevages étaient plus fréquemment colonisés par des parasites.
- Le risque d'infection par des parasites dépend de la qualité de la nourriture. Par exemple, le risque est plus élevé avec les déchets agro-alimentaires qu'avec des produits frais ou spécialisés.
- Les insectes qui entraient en contact direct ou indirect avec des animaux étaient également plus exposés.
- Il existe une synergie complexe entre certains parasites. A titre d'exemple, la présence de *Cryptosporidium spp.* est significativement corrélée avec la présence de *Balantidium spp.*, *Entamoeba spp.*, *Nyctotherus spp.*, *H. dieisigni* et *Acaridae*.

Au cours de leur recherche dans des élevages individuels, ils ont pu observer des pratiques des éleveurs contraires à l'éthique, telles que nourrir les insectes avec des excréments d'animaux provenant d'une animalerie, ou avec des cadavres d'animaux ou bien encore avec de la nourriture moisie et même de la viande crue. Ces pratiques compromettent la sécurité microbiologique de ces aliments (12).

Parmi les parasites susceptibles de contaminer les insectes et potentiellement pathogènes pour l'humain, il existe certains genres particulièrement à risque qui sont à surveiller dans la production d'insectes comestibles.

a. Le genre *Cryptosporidium*

Les *Cryptosporidium spp.* sont des parasites qui colonisent les voies digestives et respiratoires de plus de 280 espèces de vertébrés et d'invertébrés. Ils ont été associés à de nombreuses maladies animales impliquant des diarrhées chroniques (182,183). Selon la documentation, les insectes peuvent agir comme vecteurs de ces parasites. Les mouches peuvent être des vecteurs de *Cryptosporidium spp.* en transportant des oocystes dans leur

tube digestif et en contaminant les aliments (184). Cependant, la prévalence de *Cryptosporidium spp.* chez les insectes comestibles a été peu documentée. Dans l'étude Gałęcki-Sokół, *Cryptosporidium spp.* a été détectée dans le tube digestif et d'autres parties du corps de toutes les espèces d'insectes évaluées. Les chercheurs concluent que les insectes sont un vecteur sous-estimé de *Cryptosporidium spp.*, et qu'ils contribuent de manière significative à la propagation de ces parasites (12).

b. Le genre Isospora

Les *Isospora spp.* sont des protozoaires cosmopolites de la sous-classe des coccidies qui provoquent une maladie intestinale connue sous le nom d'isosporose. Ces parasites constituent une menace pour les humains (en particulier les individus immunodéprimés). L'hôte s'infecte en ingérant des ovocytes et l'infection se manifeste principalement par des symptômes gastro-intestinaux (diarrhée aqueuse). Selon la littérature, les blattes, les mouches domestiques et les bousiers peuvent agir comme des vecteurs d'*Isospora spp.* (185,186). Dans l'étude Gałęcki-Sokół, des élevages d'insectes ont été contaminés par ce protozoaire, ce qui pourrait être à l'origine de coccidioses récurrentes chez les insectivores. Le genre *Isospora* a été détecté à la surface du corps et dans le tractus intestinal des insectes. Les auteurs concluent que la présence d'*Isospora spp.* dans les insectes comestibles résulte de mauvaises normes d'hygiène dans les élevages (12).

c. Le genre Balantidium

Les représentants du genre *Balantidium* sont des protozoaires cosmopolites de la classe des *Ciliata*. Certaines espèces constituent la flore commensale des animaux, mais elles peuvent également provoquer une maladie connue sous le nom de balantidiase entraînant un syndrome dysentérique. Selon la littérature, ces protozoaires sont omniprésents chez les insectes synanthropes (type particulier d'interaction durable liant certains animaux non domestiques spécifiquement avec des humains) (187). Chez certains insectes, *Balantidium spp.* sont considérés comme faisant partie de la flore intestinale normale et peuvent participer aux processus digestifs (188). Les insectes peuvent être des vecteurs de *Balantidium spp.* pathogène pour l'humain (189). Dans l'étude Gałęcki-Sokół, des ciliés potentiellement pathogènes ont été détectés également dans des élevages d'insectes sans contact avec l'extérieur (12).

d. *Le genre Entamoeba*

Entamoeba spp. sont des amiboïdes du groupe taxonomique des *Amoebozoa* qui sont des parasites internes ou commensaux chez l'être humain et l'animal. La majorité des *Entamoeba spp.*, y compris *E. coli*, *E. dispar* et *E. hartmanni*, identifiées dans l'étude Gałęcki-Sokół appartiennent à la microflore intestinale commensale non pathogène. Cependant, *E. histolytica* a également été détecté dans l'étude présentée. *Entamoeba histolytica* peut provoquer une dysenterie chez l'être humain (12). D'autres auteurs ont démontré que *E. histolytica* est transmise par les insectes dans le milieu naturel (190,191).

e. *Les cestodes*

Les cestodes colonisent les insectes comme hôtes intermédiaires. Les cysticercoïdes, stade larvaire des ténias, tels que *Dipylidium caninum*, *Hymenolepis diminuta*, *H. nana*, *H. microstoma*, *H. citelli*, *Monobothrium ulmeri* et *Raillietina cesticillus*, ont été identifiés chez les insectes (192,193) qui ont développé des mécanismes immunitaires inhibant leur développement (193). Les ténias peuvent induire des changements de comportement chez les insectes, tels qu'une diminution significative de l'activité et du comportement photophobe (194). Les changements de comportement peuvent inciter les hôtes définitifs à consommer des insectes contenant des cysticercoïdes. L'étude Gałęcki-Sokół a démontré que les élevages d'insectes qui sont exposés au contact d'animaux ou qui intègrent des insectes provenant de sources externes courent un plus grand risque d'infection par le ténia. Des résultats similaires ont été rapportés dans des études sur les insectes synanthropes (12). Dans l'étude, des cysticercoïdes et des œufs ont été détectés, ce qui suggère que les élevages peuvent être continuellement exposés à des sources d'infection. Cependant, les corrélations entre les insectes comestibles et la prévalence de la téniose chez l'être humain et l'animal n'ont jamais été étudiées en détail. Il a été démontré que la température influence considérablement le développement des larves de ténias chez les insectes (12). De l'avis des chercheurs de cette étude, le maintien d'une température plus basse dans les élevages d'insectes pourrait diminuer considérablement le succès de reproduction des ténias, et les insectes comestibles pourraient être traités thermiquement avant la consommation pour minimiser le risque d'infection par le ténia. Les résultats de leur étude indiquent que les insectes jouent un rôle important dans la transmission des ténias aux animaux insectivores et aux humains (12).

f. *Le genre Physaloptera*

Les *Physaloptera spp.* forment des kystes dans l'hémocèle de l'hôte environ 27 jours après l'ingestion. Cawthorn et Anderson ont démontré que les grillons et les cafards peuvent

agir comme hôtes intermédiaires pour ces nématodes (195). L'étude Gałęcki-Sokół est le tout premier rapport indiquant que les *Physaloptera spp.* peuvent être transmis par les vers de farine et les criquets migrateurs. Les insectes peuvent jouer le rôle de vecteurs dans la transmission de ces parasites (12). Cependant, les hôtes définitifs ne sont pas toujours infectés (195).

g. Les spiruroïdes

Les spiruroïdes sont des nématodes parasites qui nécessitent des hôtes intermédiaires invertébrés, tels que les bousiers ou les blattes, pour terminer leur cycle de vie. Chez les sauterelles, *Spirura infundibuliformis* atteint le stade infectieux en 11 à 12 jours à des températures ambiantes de 20 à 30 °C (196). La recherche a démontré que ces insectes sont des réservoirs de *Spiruroidea* dans l'environnement naturel (197). Ces parasites forment des kystes dans les muscles, l'hémocèle et les tubules de Malpighi des insectes. Ils colonisent principalement les animaux, mais des infections humaines ont également été signalées. Selon Haruki, *Spiruroidea* peut infecter les humains qui consomment accidentellement des hôtes intermédiaires ou boivent de l'eau contenant des larves de *Gongylonema spp.* (nématodes de la superfamille Spiruroidea) (198). Dans l'étude Gałęcki-Sokół, ces nématodes ont été identifiés principalement dans des élevages importateurs d'insectes hors d'Europe (12).

h. Trypanosoma cruzi

La transmission orale potentielle de *Trypanosoma cruzi* est particulièrement à surveiller car ce parasite est responsable de la maladie de Chagas et affecte environ 10 millions de personnes en Amérique, avec plus de 10 000 personnes décédant chaque année. De mauvaises conditions de logement favorisent le contact avec des vecteurs infectés et, même si la voie orale n'est pas le principal moyen de transmission, des cas ont été rapportés dans la littérature liant l'infection à l'ingestion accidentelle d'insectes (199,200).

En conclusion, le risque d'intoxication aux parasites dans une production respectant des bonnes pratiques d'élevage, semble assez faible. Les mauvaises conditions d'élevages des insectes utilisés dans les différentes recherches citées précédemment, expliquent les situations de contamination décrites. Il est cependant nécessaire de surveiller le genre *Cryptosporidium* et les ténias. Dans l'hypothèse du développement d'une filière de production d'insectes comestibles, une réglementation adéquate permettra de maîtriser le risque.

3. Moisissures, levures et mycotoxines

Le risque d'infection fongique des insectes est étudié depuis longtemps, cependant le risque de transmission de ces infections à l'humain n'est pas encore bien documenté. La méta-étude Italienne de Garofalo, (déjà citée dans le chapitre concernant les risques bactériens) a décrit la présence de micromycètes et de levures pathogènes de l'être humain dans différents insectes transformés ou non. Ces données sont disponibles dans le tableau en annexe I. Ils ne concluent pas quant au risque de transmission de ces pathogènes à l'humain. Il est intéressant de noter que la plupart des études publiées se sont concentrées sur la détermination de la communauté bactérienne chez les insectes comestibles. Les études relatives aux levures et aux moisissures chez les insectes comestibles sont comparativement peu nombreuses (152).

Compte tenu de sa consommation fréquente dans de nombreux pays africains (1), la chenille mopane a été largement étudiée afin de mesurer et prévenir les risques sanitaires liés à sa consommation. Une étude réalisée au Botswana a démontré une détérioration de la qualité de la chenille mopane séchée au soleil (c'est-à-dire la désintégration de la chair intérieure et le changement de couleur en raison du développement de moisissures). Les isolats fongiques les plus fréquemment trouvés étaient des espèces d'*Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Cladosporium* et *Phycomycetes*. Les espèces ou souches d'*Aspergillus*, *Penicillium* et *Fusarium* sont associées à la production de mycotoxines. Mpuchane, Taligoola et Gashe ont trouvé des niveaux d'aflatoxines variant de 0 à 50 µg/kg de produit ; le niveau maximal de sécurité fixé par la FAO est de 20 µg/kg. La consommation fréquente d'aliments infectés sur de longue période est susceptible d'entraîner des risques pour la santé telle une inhibition du métabolisme donc de la croissance. De plus l'aflatoxine est carcinogène, mutagène et tératogène. Bien que les chenilles de cette étude aient été bouillies pendant 15 à 30 minutes et étalées sur des feuilles ou au sol pour sécher au soleil pendant 1 à 3 jours, les auteurs ont supposé que la contamination fût causée par l'une des sources suivantes : l'eau de mauvaise qualité, les insectes vecteurs (comme les mouches et autres diptères) et le sol. Pour maintenir la meilleure qualité sanitaire, l'étude a recommandé de sécher les chenilles rapidement et uniformément après la récolte et le traitement et de les stocker dans un endroit frais et sec (1).

Simpanya et ses collaborateurs ont étudié la contamination fongique de la chenille mopane après la récolte et le traitement pour déterminer la source possible de la contamination. Ils ont montré que le chenille mopane, peut être contaminé par des champignons et des spores fongiques provenant des feuilles utilisées comme substrat et par des champignons dans le sol pendant le séchage à long terme (≈ 5 jours) avant la

commercialisation. Une partie de l'intestin des chenilles et les chenilles entières transformées (bouillies et séchées) conservées pendant 1 an dans des conditions de laboratoire ont été analysées. Elles étaient colonisées par de nombreuses espèces de moisissures appartenant aux genres *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Chaetomium*, *Mucor*, *Phoma*, *Drechslera* et *Fusarium*. En outre, certaines espèces xérophiles (vivant dans des milieux extrêmes) et potentiellement productrices de mycotoxines ont été identifiées, telles que *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus* (producteur d'ochratoxine qui est néphrotoxique) et *Aspergillus parasiticus* (producteurs d'aflatoxines), *Aspergillus ochraceus*, *Penicillium citrinum* (producteur de la toxine citrinine qui est néphrotoxique) et *Penicillium verrucosum* (producteur de citrinine et d'ochratoxines) (201). La croissance de ces moisissures pourrait entraîner la détérioration des chenilles mopane, provoquant des changements de couleur de l'exosquelette chitineux, modifiant la croissance des mycéliums et exerçant d'autres effets néfastes (202). Mpuchane et ses collaborateurs ont signalé l'importance des bonnes pratiques de fabrication pendant le traitement des chenilles mopane; ils ont souligné (202) :

- La nécessité d'une élimination appropriée du contenu intestinal pour éviter une recontamination pendant le séchage.
- L'importance d'un séchage rapide pour éviter la contamination par le sol.
- L'importance de l'entreposage dans des conditions qui évitent la croissance fongique.

Plusieurs études ont porté sur différents moisissures et levures retrouvés dans des insectes comestibles. Le tableau VIII présente quelques exemples de contamination mis en avant par ces études.

Tableau VIII : Exemples d'micromycètes retrouvées dans des insectes comestibles (96,168,171,203–206)

Espèces d'insecte	Micromycètes
Larve de <i>Bunaea alcinoe</i>	<i>Aspergillus niger</i> <i>Penicillium caseiolum</i> <i>Fusarium moniliforme</i> <i>Saccharomyces cerevisia</i>
Larve de teigne pâle de l'empereur	<i>Aspergillus niger</i> <i>Mucor spp</i>
Larve d' <i>Oryctes monoceros</i>	<i>Aspergillus niger</i>
Larve de <i>Rhyncophorus phoenicis</i>	<i>Aspergillus niger</i>
Larve de <i>Rhyncophorus phoenicis</i>	<i>Mucor spp</i> <i>Saccharomyces cerevisia</i>

<i>Macrotermes bellicosus</i>	<i>Mucor spp</i> <i>Penicillium caseiocolum</i> <i>Fusarium moniliforme</i> <i>Saccharomyces cerevisia</i>
<i>Acheta domesticus</i>	<i>Mucor spp</i> <i>Wallemia muriae,</i> <i>Tetrapisispora namnaoensis</i> <i>Tetrapisispora fleetii</i>
Larve de <i>Tenebrio molitor</i>	<i>Mucor spp</i> <i>Candida zeylanoides</i> <i>Pichia spp.</i> <i>Debaryomyces hansenii</i>

Wynants et ses collaborateurs ont détecté dans une unité de production industrielle d'insectes comestibles des micromycètes tels que *Alphitobius diaperinus* ou *trichosporon asahii*, une levure opportuniste qui provoque une trichosporonose chez des patients immunodéprimés (207).

En conclusion, le risque d'intoxication aux moisissures, levures ou mycotoxines, semble faible. Dans l'hypothèse du développement d'une filière de production d'insectes comestibles, une réglementation adéquate permettra de maîtriser le risque.

4. Virus

Les insectes ont une quantité importante d'agents pathogènes viraux spécifiques, représentant un risque élevé pour les élevages d'insectes surpeuplés, risque qui doit être pris en compte du point de vue de la santé animale. Cependant, ces virus sont considérés comme non pathogène pour l'être humain et même, dans certains cas, approuvés comme agents de lutte biologique dans l'agriculture. Il a été démontré que les virus humains ayant une relation taxonomique avec ceux des insectes sont incapables de se répliquer chez les insectes (208).

Une étude récente a recherché plusieurs virus pathogènes de l'humain : virus de l'hépatite A, virus de l'hépatite E et le norovirus du génogroupe II. Aucun de ces virus n'a été retrouvé dans les échantillons de *Tenebrio molitor* et de *Acheta domesticus*. Les auteurs

concluent à un risque très faible de transmission d'un virus pathogène de l'humain par l'intermédiaire d'insecte comestible (209).

a. Les arbovirus

Les arbovirus, de l'anglais ARthropod-BORne VIRUSes, sont une catégorie de virus ayant pour vecteur les arthropodes souvent hématophages (tiques, moustiques et phlébotomes). On en compte aujourd'hui plus de 600 espèces. Ces virus semblent parmi les plus aptes à franchir la barrière d'espèces. Quelques arbovirus sont vecteurs de maladies, qu'on appelle alors arboviroses. La dengue, la maladie du Nil occidental, la fièvre de la vallée du Rift, fièvre hémorragique, le chikungunya, la fièvre jaune sont des exemples d'arboviroses.

Près de 150 arbovirus sont pathogènes pour l'être humain, et les principales familles pouvant comporter ces arbovirus sont :

- Les Togaviridae (virus du chikungunya)
- Les Bunyaviridae (virus de la fièvre de la vallée du Rift)
- Les Reoviridae (virus de la fièvre à tiques du Colorado)
- Les Rhabdoviridae (virus de la stomatite vésiculaire)
- Les Flaviviridae (virus de la fièvre jaune)

Il n'y pas de trace de consommation des insectes vecteurs de ces arbovirus dans la littérature. De plus, la transmission des virus implique des insectes hématophages ; la transmission se faisant lors de la pique de l'insecte. Cependant, il n'est pas possible d'exclure que certains virus pourraient être introduits dans les élevages d'insectes par substrat avec le risque de se retrouver au bout de la chaîne de la production alimentaire, d'où la nécessité de développer des stratégies de prévention (208).

b. Les virus spécifiques des arthropodes

Il existe de nombreux virus spécifiques aux arthropodes. A priori, il n'existe pas de risque de transmission de ces virus à l'être humain. Cependant, les virus peuvent poser un problème pour la production d'insectes à l'échelle industrielle.

En conclusion, le risque d'intoxication virale semble quasiment nul.

5. Prion

Les prions présentent un risque pertinent qui, chez les insectes, a été largement discuté dans le profil de risque de l'EFSA. Aucune maladie prionique spécifique n'a été observée chez les insectes en raison de l'absence du gène codant pour la protéine PrP responsable de la maladie (148). Cependant, l'impossibilité pour les insectes de déclarer la maladie n'exclut pas la possibilité d'agir comme vecteur du prion provenant de substrats à risque d'origine vertébrée avec des préoccupations potentielles pour les humains ou les animaux sensibles. Le risque peut être maîtrisé en évitant de nourrir les insectes avec de tels substrats, en évitant l'utilisation d'insectes comme aliments pour les espèces sensibles ou en traitant de manière appropriée ces matériaux pour inactiver les prions (210).

En conclusion, le risque d'intoxication à un prion semble quasiment nul néanmoins la gravité de ce risque rend nécessaire une réglementation stricte concernant les conditions d'élevage.

6. Adaptation de nouveaux pathogènes à l'humain

En plus des risques de transmission de pathogènes décrits ci-dessus, des insectes à l'humain, il existe un risque d'adaptation des micro-organismes spécifiques des insectes, à l'être humain. De nombreuses zoonoses ont été décrites montrant le passage d'un hôte animal préférentiel à l'humain. A titre d'exemple H5N1, la grippe aviaire, la fièvre aphteuse, l'encéphalopathie spongiforme bovine et la fièvre Q (149).

Récemment, il semble y avoir eu une sérieuse augmentation des zoonoses en raison de l'intensification de la production animale et de la destruction des niches écologiques ainsi que du changement climatique poussant le rapprochement de la faune sauvage avec les populations humaines. Ces dernières années, l'émergence de nouveaux coronavirus (SARS-CoV-1, MERS-CoV, SARS-CoV-2) et des virus de la grippe A (H5N1 et H7N7) a suscité une inquiétude mondiale quant au potentiel de pandémies (149). De nombreuses zoonoses passées sont restées dans des populations localisées (1). Un certain nombre d'exemples existent dans diverses parties du monde, notamment la leishmaniose zoonotique cutanée à Manaus, au Brésil ; Ebola, monkeypox et fièvre de la vallée du Rift en Afrique et dans la péninsule arabique ; Fièvre hémorragique de Crimée-Congo au Moyen-Orient ; encéphalopathie spongiforme bovine (ESB) en Europe et ailleurs ; La fièvre du Nil occidental au Canada et aux États-Unis; et paramyxovirus en Australasie. Ceci démontre qu'une grande variété d'espèces animales, domestiques et sauvages, servent de réservoirs à des agents

pathogènes, qui peuvent prendre la forme de virus, de bactéries ou de parasites (211). Dans un monde globalisé, la probabilité que les épidémies localisées évoluent en pandémies augmente. Le COVID-19 est un exemple évident de ce phénomène (149).

Dans le secteur de l'élevage, les agents pathogènes porteurs de maladies infectieuses sont soumis à des pressions résultant de l'environnement de production, de transformation et de vente au détail. Ensemble, ces facteurs modifient la fréquence des contacts avec l'hôte, la taille de la population et / ou les flux de trafic microbien dans la chaîne alimentaire. Les insectes destinés à l'alimentation humaine et animale n'ont pas été suffisamment testés pour déterminer le risque de transmission de maladies aux humains. Les installations d'élevage intensif d'insectes seront également soumises aux mêmes pressions que celles rencontrées dans la production animale et, à l'heure actuelle, il n'existe pas de données claires dans la littérature montrant que ces installations pourraient être une source de pathogènes émergents nuisibles (1).

III. Toxicité intrinsèque

1. Substances chimiques

Une recherche approfondie sur le contenu en substances nocives des insectes doit inclure les composés qui sont soit naturellement présents dans les aliments pour insectes, soit synthétisés par ceux-ci.

a. Venins

Le terme venin désigne toute substance toxique produite par des animaux et destinée à tuer ou paralyser leurs proies. Chez les insectes, les venins se retrouvent principalement chez les coléoptères et les hyménoptères (abeilles, guêpes, frelon, fourmis, etc.). Le venin contient des peptides comme des phospholipases (212) et des substances de faible poids moléculaire telles que l'histamine ayant un effet sur les vaisseaux sanguins, les muscles lisses et les nerfs. Les composants de poids moléculaire élevé dans le venin ont souvent une activité enzymatique et peuvent en outre agir comme des allergènes. Il peut être difficile de séparer les réactions allergiques des réactions vasovagales ou psychogènes en se basant uniquement sur les antécédents cliniques (213).

Certaines toxines sont particulièrement dangereuses par pique pour l'humain :

- La philanthotoxine est la toxine la plus active, isolée du venin de la guêpe pelleteuse *Philanthus triangulum* et joue un rôle clé dans la paralysie rapide de ses proies (214).
- La solénopsine est un alcaloïde présent dans le venin des fourmis de feu du genre *Solenopsis*, réputées pour leurs piqûres douloureuses (215).
- Apamin est un petit peptide présent dans le venin d'abeille (environ 2% du venin d'abeille sec). Il agit en bloquant les canaux potassiques à faible conductance et activés par le calcium.
- La mélittine est un petit peptide provenant du venin de l'abeille domestique *Apis mellifera*. Il contribue fortement aux propriétés allergiques du venin d'abeille.
- Diamphotoxinis produit par des coléoptères du genre *Diamphidia*. Il est produit à la fois par des larves et des adultes. Il est hémolytique et cardiotoxique.
- La leptinotarsine, d'action similaire à la diamphotoxinis, est produite par des coléoptères du genre *Leptinotarsa*. Cependant cette dernière est un peptide (216).
- Le mastoparan est une petite toxine peptidique issue du venin de guêpe (214). Une étude américaine montre que cette molécule a des effets cytotoxiques sur les cellules épithéliales de l'intestin *in vitro* (217).

Jusqu'à maintenant, les études ne se sont pas intéressées à la toxicité des venins d'insectes après ingestion. Seule la larve de l'abeille domestique est consommée et elle ne contient pas de venin. De plus, une grande partie des venins sont des peptides et on peut penser qu'ils sont détruits lors de la digestion.

Néanmoins, des études sont nécessaires pour affirmer ou infirmer la toxicité de ces insectes en tant que nourriture.

b. Antinutriments

Les facteurs antinutritionnels sont des composés chimiques, naturels ou synthétiques, qui interfèrent avec l'absorption des nutriments tant chez l'être humain que chez les animaux. Ils sont particulièrement dangereux pour les personnes ayant une mauvaise alimentation avec des sources limitées de nutriments, en particulier de vitamines (75). Certains antinutriments sont des toxines, tandis que d'autres, comme les phytates et les tanins, peuvent également avoir des effets bénéfiques, qui sont déterminés à la fois par leur structure chimique et les doses employées (75).

i. Thiaminase

Il a été déterminé que les chrysalides du ver à soie africain (*Anapache spp.*) contiennent une thiaminase résistante à la chaleur. La consommation humaine de cette molécule peut

induire une carence en vitamine B1 et donc entraîner un syndrome ataxique, dont la forme extrême est le béribéri (218).

ii. *Acide phytique*

En raison de son effet chélatant, l'acide phytique peut contribuer à diminuer la biodisponibilité des minéraux et entraîner des déficits en phosphore, calcium, fer, magnésium, zinc (219). L'acide phytique a été retrouvé chez certains insectes comme certaines chenilles. Cependant il a été retrouvé à des taux inférieurs aux limites des valeurs nutritionnellement acceptées, le risque pour la consommation humaine paraît faible (220,221).

c. *Autres substances chimiques*

i. *Cyanure d'hydrogène*

Certains papillons de nuit du genre *Zygaena* contiennent des glucosides cyanogéniques, libérant du cyanure d'hydrogène lors de leurs dégradations. Le cyanure d'hydrogène est particulièrement toxique pour l'organisme en se fixant sur les atomes de fer contenus dans l'hémoglobine, la thiamine et la cytochrome oxydase, inhibant cette dernière responsable de la respiration cellulaire. Cependant, ces insectes contiennent des quantités très faible. Zagobelny estime qu'il faudrait 170 papillons de nuit pour un enfant, et 680 pour un adulte pour atteindre la DL₅₀ du cyanure d'hydrogène (1,5 à 3,5 mg / kg) (222). Dans la région de Carnia, dans le nord-est de l'Italie, il est de coutume pour les enfants de manger les ingluvies (la portion élargie de l'œsophage dans de nombreux mollusques, insectes et oiseaux, qui sert à stocker des aliments) du papillon de nuit (222). Ils contiennent de très faibles quantités de glucoside cyanogénique mais de grandes quantités de divers sucres. Les enfants ramassent les papillons au début de l'été quand ils sont nombreux et les dissèquent eux-mêmes, ne mangeant que les ingluvies.

Il y a cependant peu de rapports sur les effets indésirables causés par la consommation d'insectes (1). Néanmoins, des cas de syndrome d'ataxie, caractérisés par des tremblements et des niveaux variables de troubles de la conscience, ont été signalés après la consommation du ver à soie saisonnier *Anaphe venata* dans le sud-ouest du Nigéria (223). Des études supplémentaires ont indiqué que la réaction était très probablement liée à une sous-alimentation structurelle chez les consommateurs qui, étant légèrement déficients en thiamine en raison d'un régime alimentaire à base de glucides contenant des glycosides cyanogénétiques se liant à la thiamine, subissent une exacerbation saisonnière de leur carence en thiamine (1).

Au Cameroun et au Nigéria, le criquet puant africain (*Zonocerus variegatus*) doit être préparé d'une manière spécifique en chauffant les insectes dans de l'eau tiède puis en changeant l'eau avant la cuisson ce qui permet d'inactiver certaines enzymes pouvant relarguer du cyanure d'hydrogène (224).



Figure 28 : Photo de *Zonocerus variegatus* prise au Ghana - source : Stephen Buchan

ii. *Hétéroside cardiotonique*

En plus de la présence des enzymes pouvant relarguer du cyanure d'hydrogène, le *Zonocerus variegatus* (consommé en Afrique centrale et du sud) est capable de concentrer dans ses tubules de Malpighi (tubes excréteurs permettant d'éliminer les déchets chez les insectes) certaines toxines présentes dans les plantes qu'ils consomment, comme l'ouabaine, un hétéroside cardiotonique (225).

iii. *Alcanes et des aldéhydes des famille Tessératomides et Pentatomidae*

De même, la famille des *tessératomides* tel que *Encosternum delegorguei* au Zimbabwe et en Afrique du Sud excrète un liquide piquant (226) composé de différents alcanes et aldéhydes comme le trans hex-2-ényl acétate, pouvant provoquer une douleur intense et même une cécité temporaire en cas de contact avec les yeux. Par conséquent, l'insecte est consommé après avoir retiré le liquide en serrant le thorax et en plaçant l'insecte dans de l'eau tiède (227).

De même, la punaise puante *Nezara robusta*, de la famille des *Pentatomidae* est largement consommée en Afrique australe. Les insectes sont préparés dans de l'eau tiède pour être consommés, bien que des précautions doivent être prises car ces insectes excrètent également des alcanes et des aldéhydes. Après trempage dans l'eau, l'insecte éjecte les toxines et perd sa puissante odeur. L'insecte n'est jamais placé dans de l'eau bouillante, car

cela le tuerait immédiatement et entraînerait la rétention du poison. Après lavage, l'insecte perd sa coloration verte et devient jaune or pâle. Il est ensuite cuit avec un peu d'eau et de sel (1).

iv. *Stéroïdes métaboliques*

Des stéroïdes métaboliques (dihydrotestostérone, testostérone) ont été retrouvés chez des coléoptères (famille des Dytiscidae) (228). On peut penser que si ces stéroïdes sont régulièrement consommés, ils peuvent entraîner une hypofertilité, un retard de croissance, une masculinisation chez les femmes, un ictère, un œdème et même un cancer hépatique (228). Cependant, il n'y a pas de cas décrits dans la littérature.

v. *Cantharidine*

Le monoterpène cantharidin est synthétisé par la mouche espagnole (*Lytta vesicatoria*) et plusieurs coléoptères. Ce monoterpène est lié à des protéines qui sont, par conséquent, appelées protéines de liaison à la cantharidine. S'ils sont consommés, les effets toxiques comprennent des nausées, des difficultés à avaler et des vomissements de sang, et peuvent s'avérer mortels s'il pénètre dans la circulation sanguine (229). Les œufs et les ovaires de *Lytta vesicatoria*, qui hébergent également de la cantharidine, provoquent une irritation de la vessie et de l'urètre, et parfois du priapisme. Ces insectes ne sont pas consommés régulièrement.

2. Agents physiques

En République démocratique du Congo, Bouvier a observé que la consommation de sauterelles et de criquets sans enlever les pattes provoquait une constipation intestinale car les grosses épines du tibia s'accrocheraient dans l'intestin. Le seul remède chez l'être humain après la consommation est souvent une intervention chirurgicale pour retirer les pattes de l'intestin (230). De même, dans l'est de Java, en Indonésie, des patients ayant mangé de grandes quantités de scarabées grillés (*Lepidiota spp.*), dont les restes chitineux indigestes peuvent s'accumuler à plusieurs endroits à l'intérieur de l'intestin et provoquer une constipation totale, ont dû subir une intervention chirurgicale. Les autopsies de singes morts à la suite d'invasions acridiennes ont révélé que la consommation de sauterelles s'est révélée fatale pour la même raison. L'étiquette du produit du criquet migrateur actuellement vendu sur le marché néerlandais, indique clairement que les pattes et les ailes de l'insecte doivent être enlevées avant la consommation (1).

IV. Contamination extrinsèque

1. Métaux lourds

La bioaccumulation ou biomagnification décrit le processus par lequel les concentrations de certaines substances croissent à chaque stade de la chaîne alimentaire. Les phénomènes de biomagnification sont complexes car ils dépendent de la présence des éléments lourds dans l'environnement, de l'exposition des organismes vivants et de leur capacité à éliminer ou non les différents métaux.

Les insectes n'échappent pas à ce phénomène. Par exemple, les grillons peuvent contenir du cadmium, de l'arsenic, du plomb et de l'étain. La concentration de métaux lourds dans les grillons dépend de la présence de métaux lourds dans leurs aliments ou dans les polluants du sol. Selon Bednarska, les grillons régulent plus efficacement leur exposition alimentaire au zinc qu'au cadmium, ce qui suggère que les grillons ont tendance à accumuler du cadmium (231). Cette hypothèse est soutenue par d'autres auteurs, en utilisant des données d'autres espèces du genre *Orthoptera* (232,233). Selon Poma et son équipe, les concentrations de tous les métaux lourds testées dans leur étude (cadmium, arsenic, chrome, plomb et étain) se situaient dans les limites acceptables pour la consommation humaine (234).

Des données sur la bioaccumulation des métaux lourds chez d'autres espèces d'insectes sont disponibles. Cependant, l'extrapolation de ces données aux grillons pourrait être inexacte, car d'importantes différences métaboliques et physiologiques existent entre les espèces d'insectes. Les variations saisonnières des concentrations de métaux, ainsi que les différences dues aux stades de développement, jouent manifestement un rôle dans le phénomène de bioaccumulation (235). La présence de métaux lourds, tels que l'arsenic, l'aluminium, le cadmium, le chrome et le mercure, dans les insectes comestibles utilisés pour la consommation humaine mérite des recherches supplémentaires. Sur la base des quelques études disponibles, les niveaux détectés dans les aliments destinés aux insectes sont conformes au règlement (UE) 1881/2006 pour les contaminants (236).

Des métaux nocifs de l'environnement ont été trouvés dans les cellules de plusieurs parties du corps d'insectes - tels que la graisse, le tégument (exosquelette), les organes reproducteurs et les voies digestives - où ils se bioaccumulent. Une étude sur les larves de vers de farine jaunes (*Tenebrio molitor*), a montré que les insectes accumulent du cadmium et du plomb dans leur corps lorsqu'ils se nourrissent de matière organique dans les sols qui contiennent ces métaux (237). Cependant, Lindqvist et Block ont montré qu'après chaque mue, les larves perdent du cadmium et des quantités encore plus importantes de métal sont

perdues après la métamorphose (238). D'autres études ont montré que l'absorption des éléments ne semble pas être fortement régulée chez les insectes (239). Après absorption, l'élément peut être lié à des métallothionéines ou séquestré dans des vésicules, ce qui inactive efficacement ces métaux. Dans certains cas, ceux-ci sont excrétés par exocytose dans la lumière du tube digestif (239,240).

Une étude de Green a montré que les papillons de nuit des Alpes victoriennes transportent des quantités sublétals d'arsenic absorbées dans les aires de reproduction des basses terres à partir de plantes dans des zones où des herbicides ont été utilisés. L'arsenic était concentré à des niveaux dommageables sur les sites d'estivation (similaires à l'hibernation), en raison de la concentration de millions de papillons dans ces zones (241).

Une étude portant sur la consommation de poulet nourris avec des criquets chapulines ayant une teneur élevée en plomb, a montré une bioaccumulation dans les poulets et les ont associées à des taux élevés de plomb dans le sang chez les femmes enceintes et les enfants consommant ces poulets (242). Cependant les criquets n'étaient pas la seule source de plomb contaminant la population étudiée.

Les insectes ont été proposés comme sentinelles pour surveiller le niveau de contaminants dans l'environnement (243). Des recherches supplémentaires sur les conséquences possibles pour la consommation humaine sont nécessaires. Néanmoins, l'élevage permettant de maîtriser le contenu de l'alimentation et l'environnement des insectes, le risque de contamination humaine aux métaux lourds semble beaucoup plus faible.

2. Pesticides ou polluants organiques

Un autre sujet de préoccupation est l'absorption de pesticides par les insectes comestibles tels que les criquets et les sauterelles, qui peuvent causer des toxicités lorsqu'ils sont consommés en grande quantité. Ces risques sont une préoccupation majeure dans les pratiques traditionnelles de récolte et de consommation d'insectes dans la nature, où le contrôle des applications chimiques est difficile. Cela pourrait être un avantage de l'élevage d'insectes par rapport aux autres élevages d'animaux, où les risques chimiques peuvent être contrôlés dans une plus large mesure (surface d'élevage plus faible, élevage isolé, etc.) (1).

Il est à noter que tous les pesticides adoptés contre les insectes sont potentiellement dangereux pour l'humain, principalement si les produits sont collectés dans la nature et non dans l'agriculture contrôlée (75). Cette considération est étayée par un cas en Thaïlande où, après avoir mené un important programme de désinfestation, des insectes morts ont été mis sur le marché et ont causé des problèmes de santé pouvant être mortels pour les

consommateurs en raison de l'empoisonnement par les pesticides accumulés dans les insectes (244). Un deuxième cas a eu lieu en 1988-1989 au Koweït, où les criquets qui ont envahi le pays ont été aspergés de pesticides pour sauver les cultures et la végétation. Les résultats des criquets capturés ont montré que les pesticides chlorés étaient présents à des niveaux élevés. Des pesticides organophosphorés ont été trouvés, en particulier le sumithion et le malathion, qui sont respectivement considérés comme modérément et légèrement toxiques. Cela a posé un risque pour les personnes qui ingéraient des criquets (39).

Des substances nocives peuvent également être présentes dans les aliments pour insectes. En général, l'accumulation de toxines dans les aliments est une stratégie de survie simple dans le processus évolutif, mais certains de ces composés peuvent perdre leurs propriétés à travers les processus de cuisson.

Brown et ses collègues ont montré l'existence de la benzoquinone chez les insectes (75). Cette substance appartient à la famille des quinones, qui sont des composés phénoliques largement distribués dans les plantes. La plupart des quinones a un goût amer (75). Cette substance est présente chez les *Tenebrionidae*. En présence de benzoquinone, les *Tenebrionidae* peuvent être cytotoxiques contre la lignée cellulaire épithéliale de carcinome pulmonaire humain A-549, ce qui entraîne une dégradation de l'ADN. Certains scientifiques affirment que le mécanisme d'endommagement de l'ADN pourrait conduire au cancer chez les personnes qui entrent en contact avec des benzoquinones, précisément des éthylbenzoquinones et les méthylbenzoquinones, qui sont également enfermées dans des coléoptères adultes tel que *Tribolium castaneum* et *Tribolium confusum* (75). Cependant, le Centre International de Recherche sur le Cancer déclare officiellement qu'aucune donnée épidémiologique n'est disponible sur la cancérogénicité de la 1,4-benzoquinone retrouvée dans ces insectes.

3. Médicaments vétérinaires

L'industrialisation et la densification des élevages avicoles ont nécessité l'utilisation d'antibiotiques à large spectre et en grande quantité pour accroître la productivité. Ces médicaments sont retrouvés dans l'alimentation humaine et présente un risque notamment d'antibiorésistance des bactéries (245). L'industrie des insectes comestibles n'est pas encore assez importante pour avoir besoin de recourir à ces méthodes. Cependant, avec le développement de l'entomophagie, une surveillance et une réglementation de l'utilisation des médicaments vétérinaires seront nécessaires.

Exemple du Ténébrion

Comment garantir un élevage, une production et une consommation sûr et de qualité en Europe ?

Les larves de *Tenebrio monitor* (*TM*) ou Ténébrion meunier ou encore ver de farine (jaune) sont largement consommées dans le monde entier. Le *TM* fait partie des plus gros coléoptères. L'insecte adulte a une longueur moyenne de 1,5 cm et une largeur de 0,5 cm, tandis que la larve peut atteindre 2,5 cm en fin de développement (figure 29) (246). Il infeste les produits alimentaires, notamment les farines de céréales, dans les entrepôts. Il fait partie des espèces d'insectes comestibles les plus consommées dans le monde. Il est originaire d'Europe mais disséminé partout dans le monde. En Europe, il a été élevé dans un premier temps comme appât pour la pêche à la ligne ou comme nourriture pour certains animaux de compagnies (reptiles, araignées, etc.) (246). La recherche à grande échelle sur l'élevage d'insectes pour l'alimentation humaine et animale s'est rapidement intéressée aux *TM* pour sa composition nutritionnelle riche (annexe IV), la densité élevée d'insecte dans les élevages, son faible besoin en eau ainsi que pour son alimentation à base de farine de céréale essentiellement (1).

Les conditions de développement à l'état sauvage du *TM*, notamment son cycle de vie court, laissent penser qu'il est capable de s'adapter rapidement à des conditions d'élevage. De ce fait, le *TM* semble être un bon candidat pour des élevages à l'échelle industrielle. En protection des cultures, la recherche a permis d'acquérir de nombreuses connaissances sur les entomopathogènes et sur la manière de les utiliser pour lutter contre les insectes. Cependant, les chercheurs en savent très peu sur les maladies d'insectes qui apparaissent en les élevant dans de grandes unités de production : caractérisation biologique et génétique, phylogénie, gamme d'hôtes, transmission, persistance, potentiel épidémique et sécurité pour l'humain (9). Comme pour toute ressource alimentaire produite à une échelle industrielle, il existe différents risques tout au long du processus de fabrication : de l'élevage à la consommation en passant par le stockage et la transformation en produit consommable.

I. Méthode HACCP

L'analyse des dangers - points critiques pour leur maîtrise (HACCP) est une méthode mise en place par la NASA dans les années 60. C'est un outil scientifique et systématique, permettant d'identifier les dangers spécifiques et d'établir des systèmes de contrôle pour garantir la sécurité sanitaire des aliments (247). Son objectif est de nature préventive, plutôt que de s'appuyer principalement sur les tests du produit final. Le HACCP est reconnu dans le monde entier comme un système d'assurance qualité, identifiant, évaluant et contrôlant les risques physiques, chimiques et biologiques tout au long du processus de production. Le système peut être appliqué à l'ensemble de la chaîne alimentaire, de la production primaire à

la consommation finale. En plus d'augmenter la sécurité alimentaire, l'application du HACCP peut faciliter l'inspection par les autorités réglementaires et promouvoir le commerce international en renforçant la confiance. Pour ces raisons, l'adoption du HACCP tout au long de la chaîne d'approvisionnement en insectes sera un facteur déterminant du succès et du développement du secteur des insectes comestibles. Selon la FAO, « tout système HACCP est capable de s'adapter au changement, comme les avancées dans la conception des équipements, les procédures de traitement ou les développements technologiques » (248).

Elle est basée sur 7 principes décrits comme suit par la direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (249) :

- L'analyse des dangers : elle consiste à rassembler et évaluer les dangers et les conditions entraînant leur présence afin de déterminer ceux qui sont significatifs au niveau de la sécurité des aliments, et devront par conséquent être surveillés.
- L'identification des points critiques : leur maîtrise et leur contrôle sont nécessaires pour surveiller ou éliminer un danger.
- L'établissement des limites critiques à ne pas dépasser pour un danger (distinction entre l'acceptable et l'inacceptable).
- La mise en place d'une procédure de surveillance des points critiques.
- La définition et mise en œuvre des actions correctives en cas de non-conformité (si le point critique n'est pas maîtrisé) : c'est-à-dire corriger la ou les causes de non-conformité. Dans le cas où la limite critique n'est pas respectée, le produit est alors dit « non-conforme » et le professionnel se doit de prendre des mesures pour corriger cela.
- La vérification de l'efficacité des actions correctives : le professionnel doit s'assurer que, suite aux actions réalisées, les denrées produites sont à nouveau conformes et ne dépassent pas la limite critique.
- La mise en place d'un système documentaire précis et rigoureux afin de prouver la mise en œuvre des mesures et l'enregistrement des actions menées. Ces documents doivent être conservés et pourront être demandés lors d'audits ou de contrôles réglementaires.

L'élevage d'insectes et la production de denrées alimentaires à base d'insectes ne sont pas encore encadrés par des règlements ou des normes européennes. Dans l'attente d'une réglementation, il semble pertinent d'utiliser la réglementation encadrant la production et la consommation de viande, de poisson ou de crustacées pour définir les risques et les limites.

II. Elevage

Le concept d'élevage d'insectes est relativement nouveau. Les insectes sont élevés dans une zone bien définie et les conditions de vie, le régime alimentaire et la qualité des aliments sont contrôlés. Les insectes d'élevage sont gardés en captivité et sont ainsi isolés de leur population naturelle (1). Finke a exploré la valeur nutritive de plusieurs espèces d'insectes, dont le ver de farine jaune. Les larves de coléoptères ont été mentionnées comme une option prometteuse pour l'élevage de masse car l'espèce est facile à cultiver à grande échelle, elle a un cycle de vie court et une expertise est déjà disponible, en particulier dans l'industrie des aliments pour animaux de compagnie (250). De plus le *TM* est endémique des pays des climats tempérés. Il ne pose pratiquement aucun risque pour l'environnement (envahissement de nouvelles niches écologiques, etc.), il n'y a pas besoin de contrôle climatique et cette espèce locale est susceptible d'être mieux acceptées culturellement (250).



Figure 29 : Photos de différents stades de développement du ténébrion - source : Caraculus

La production à l'échelle industrielle a été définie lors d'une réunion d'experts de la FAO comme une production minimale de 1 tonne par jour d'insectes frais. En outre, les espèces destinées à la production de masse doivent posséder certaines caractéristiques :

- Un cycle de développement court
- Une survie élevée des immatures et un taux de ponte élevé
- Un potentiel élevé d'augmentation de la biomasse par jour
- Un taux de conversion élevé
- La capacité de vivre dans des densités élevées (kg de biomasse par m²)
- Une faible vulnérabilité aux maladies (résistance élevée)

En raison de la vulnérabilité des systèmes de production, une forte dépendance à l'égard d'une seule espèce est déconseillée.

1. Conditions d'élevage

Les larves de *TM* se développent à une température moyenne de 25 à 27 °C (246). Les larves pouvant manger les nymphes, il est préférable de séparer les différents stades de développement. Les *TM* vivent en densité élevée, néanmoins si la densité l'est trop, il y a un risque de cannibalisme.

Les larves de *TM* se développent bien sur des farines de blé ou de soja avec une teneur en humidité de seulement 10% et une humidité relative dans l'air de 70%. Dans ces conditions, la larve a une croissance d'environ 90 jours avant d'atteindre sa taille maximale (251). Les larves ont besoin d'une concentration alimentaire en glucides d'au moins 40% pour se développer. La substitution de l'amidon par du glucose permet d'améliorer la croissance des larves de *TM* (251). Une croissance optimale est atteinte lorsque l'insecte est élevé sur des régimes contenant de 70 à 80% de glucides (1) avec seulement 10% de protéines sous forme de caséine (251).

Leclercq a rapporté les résultats d'expériences nutritionnelles. Il semble que certaines vitamines et nutriment soient importants (252) :

- Le cholestérol
- La thiamine ou vitamine B1
- La riboflavine ou vitamine B2
- La niacine ou vitamine B3
- Acide pantothénique ou vitamine B5
- La pyridoxine ou vitamine B6
- La biotine ou vitamine B8
- Acide folique ou vitamine C

Cinq de ces nutriments (les vitamines B1, B2, B3, B5 et B6) sont des facteurs primordiaux. En l'absence d'un de ces facteurs, les larves de *TM* cessent leur croissance.

Même si les larves n'ont pas besoin de source d'eau pour se développer (246), leur croissance est plus rapide lorsque de l'eau est disponible (253). Les larves élevées en présence d'humidité sont par ailleurs plus lourdes ; cette différence de poids n'est pas due à une teneur en eau mais à une teneur en matières grasses plus élevée. Les insectes peuvent être nourris avec des flux de déchets organiques de faible valeur, néanmoins leurs valeurs nutritionnelles en seront affectées (1).

Isoler les insectes permet de les protéger d'une transmission de pathogènes par les insectes sauvages. Néanmoins, ces conditions confinées peuvent également avoir un effet génétique sur les populations par la dépression de consanguinité et la dérive génétique de sorte qu'ils ne ressemblent souvent plus beaucoup aux populations sauvages sélectionnées initialement (246). Cet effet peut permettre de sélectionner les insectes pour augmenter le rendement selon des critères spécifiques (reproduction, teneur en nutriment, etc.) mais il peut également être à l'origine de l'adaptation de micro-organismes commensaux des insectes à l'humain. Ces micro-organismes peuvent donc devenir pathogène pour l'être humain.



Figure 30 : Photo d'un élevage de larves de *TM*, nourries avec un mélange de farine de blé, de malte et de carotte. – source : *nutrigrreenplanet*

2. Risques allergiques

Pour la grande majorité des personnes, l'exposition aux insectes n'engendre pas de risque significatif de réaction allergique, en particulier chez des individus non allergiques ou non sensibilisés aux arthropodes (1). Néanmoins, les études réalisées chez les personnes exposées aux insectes par inhalation ou manipulation ont déjà confirmé un potentiel sensibilisant. Le ténébrion est en cause dans l'asthme professionnel. Son rôle est bien documenté chez des sujets travaillant dans les entreprises produisant les appâts, et aussi chez les pêcheurs à la ligne manipulant les larves vivantes (246). Dès 1983, Bernstein démontrait la responsabilité du *TM* dans l'asthme professionnel chez 4 sujets (254). Par ailleurs, l'étude de Siracusa montre une fréquence élevée de sensibilisation à différents appâts de pêche chez les personnes les produisant. Une sensibilisation à *TM* est retrouvée dans 28,6% des cas et 2 sujets sur 7 sont symptomatiques lorsqu'ils sont exposés au ver de farine (255). Une autre

étude du même auteur documente la sensibilisation et l'allergie aux appâts chez 13 pêcheurs. Outre les cas d'allergies professionnelles, un cas d'allergie à *TM* lié à la pratique de la pêche à la ligne est rapporté par Ledent et Mairesse : le prick-test est très positif, les IgE spécifiques sont très élevées et le test d'exposition est nettement positif (256).

Le risque de déclarer une allergie à cet insecte n'est pas négligeable. Il sera donc important, pour les éleveurs, de se protéger d'un contact direct avec les insectes (utilisation de gants et de combinaison, etc.). La sensibilisation peut également se faire par inhalation des poussières, il est donc important de s'en protéger (utilisation de masque, ventilation, etc.).

3. Risques microbiologiques

L'élevage d'insectes, contrairement à la récolte, permet un meilleur contrôle des pratiques hygiéniques et des sources d'alimentation, atténuant les risques microbiologiques potentiels. Il est vrai que les conditions de croissance ne sont pas aseptiques et que la présence de microorganismes pathogènes de l'humain est possible. Avec une humidité relative dans l'air de 70% et une teneur en eau de 10% dans l'alimentation, le risque de croissance problématique de microorganisme est assez faible. Le tractus intestinal des insectes présente le plus grand risque d'un développement de microorganismes pathogènes de l'être humain (251).

Peu d'études ont examiné la dynamique microbienne lors de la production d'insectes comestibles à l'échelle industrielle. Osimani, Milanović, Cardinali, Garofalo ont évalué le microbiote bactérien au cours d'un cycle de production en laboratoire de larve de *TM*. Le substrat (farine de blé), les larves fraîches de vers de farine, les excréments et les effluves ont été analysés. Des niveaux élevés d'aérobies mésophiles totaux, d'entérobactéries et de bactéries lactiques, et dans une moindre mesure, de bactéries sporulantes, ont été détectés. En revanche, la contamination microbienne totale du substrat était faible. Il n'a pas été détecté de *Listeria monocytogenes* et *Salmonella spp.* qui sont des pathogènes alimentaires particulièrement dangereux pour l'être humain. Les résultats ont révélé une dominance d'entérobactéries (*Enterobacter spp.*, *Erwinia spp.*, *Klebsiella spp.*, *Pantoea spp.*, et *Xenorhabdus spp.*), de bactéries lactiques (*Enterococcus spp.* et *Lactococcus spp.*) et de bactéries du genre *Spiroplasma* (166).

Une méta-étude s'intéressant aux microbiotes des insectes, a recensé plusieurs genres de bactéries retrouvées dans des *TM* frais. Les insectes sont issus d'élevages (Tableau IX). Les résultats confirment ceux obtenus par l'étude précédente. Le risque bactérien paraît assez faible (152). Si on se réfère aux principaux germes bactériens impliqués dans les toxiinfections

ou les intoxications alimentaires (Annexe II) (257), seules les genres *Clostridium* et *Staphylococcus* sont présents dans le microbiote. Cependant, cette étude ne précise pas les espèces de *Clostridium* et de staphylocoque mis en cause. De plus, la littérature n'est pas assez complète à ce sujet pour conclure aux risques bactériens sur la santé humaine.

Tableau IX : Différentes bactéries retrouvées dans le microbiote intestinal de *Tenebrio molitor* issus d'élevages (152).

Bactéries retrouvées dans le microbiote de vers de farine		
<i>Clostridium spp.</i>	<i>Klebsiella spp.</i>	<i>Pseudomonas spp.</i>
<i>Enterobacter spp.</i>	<i>Lactobacillus spp.</i>	<i>Spiroplasma spp.</i>
<i>Enterococcus spp.</i>	<i>Lactococcus spp.</i>	<i>Staphylococcus spp.</i>
<i>Erwinia spp.</i>	<i>Pantoea spp.</i>	<i>Streptococcus spp.</i>
<i>Haemophilus spp.</i>	<i>Propionobacterium spp.</i>	<i>Xenorhabdus spp.</i>

La méta-étude citée précédemment ne révèle pas de micromycètes ou de levures pathogènes pour l'humain dans les élevages présentant des conditions correctes d'humidités (152). Toutefois les auteurs ne concluent pas quant au risque de contamination. Il est nécessaire de faire d'autres études et de rester vigilant.

L'étude s'intéressant à la contamination parasitaire de 300 élevages d'insectes, cité dans le chapitre sur les parasites a retrouvé, dans le cas du *TM*, 10 parasites différents potentiellement pathogènes pour l'humain (tableau X) (12). Les genres *Taenia* et *Entamoeba* sont particulièrement courants dans les intoxications. L'étude ne précise pas l'espèce d'*Entamoeba*. *Entamoeba histolytica*, pathogène alimentaire important, peut provoquer des dysenteries sévères. Pour infecter l'être humain, ces parasites doivent être ingérés. Lors de l'élevage ce risque paraît négligeable.

Tableau X : Quantité d'élevages où différents parasites ont été retrouvés sur 300 élevages différents de vers de farine (12).

Parasites retrouvés dans 300 élevages différents de vers de farine			
4%	<i>Cryptosporidium spp.</i>	3%	<i>Cysticercoides du ténia</i>
14,6 %	<i>Gregarine spp.</i>	1,3%	<i>Physaloptera spp.</i>
2,3%	<i>Isospora spp.</i>	1,6%	<i>Spiruroidea</i>
3,6%	<i>Balantidium spp.</i>	0,6%	<i>Acanthocephala</i>
3%	<i>Entamoeba spp.</i>	11,6%	<i>Acaridés</i>

Au vu des risques faibles supposés de contamination du *TM* par des pathogènes humains, il est possible de prendre les mêmes précautions sanitaires que pour la viande conventionnelle au moment de l'abattage (258), soit la vérification de la conformité de

l'élevage (environnement sain, alimentation conforme, recherche de moisissure, etc.) et l'inspection visuelle systématique des insectes (bonne santé des animaux, etc.).

4. Contaminations extrinsèques

Dans une étude visant à analyser l'accumulation de métaux lourds chez le *TM*, il a été démontré que l'insecte était capable de concentrer l'arsenic. À l'inverse, les concentrations de plomb retrouvées dans l'insecte étaient inférieures aux concentrations de l'environnement (237). Il est donc nécessaire d'accroître la vigilance du taux d'arsenic dans l'environnement (nourritures, eaux, milieux, etc.) des élevages de ténébrions. D'autres polluants tels que les pesticides peuvent se retrouver dans les insectes. La nourriture doit respecter les normes européennes en termes de concentration de polluants organiques. Cependant l'union européenne a établi des normes pour les produits finis et non pour les animaux vivants dans les élevages (Annexe III). Dès l'élevage, il est nécessaire de limiter le contact entre les insectes et les polluants, limitant ainsi la présence de ces substances dans les insectes prêts à consommer.

Jusqu'à maintenant, les élevages n'ont pas eu besoin d'avoir recours à des médicaments vétérinaires. Il n'y a donc pas de risque pour les éleveurs à ce niveau. De plus, au vu de la rapidité de reproduction du *TM*, il est possible d'imaginer que, si une infection survient dans l'élevage, il est plus rentable de détruire les individus contaminés que d'avoir recours à un traitement.

III. Transformation, conservation et stockage

Les insectes comestibles peuvent être consommés comme plat principal, collation ou ingrédient alimentaire, ils sont donc commercialisés sous différentes formes (152) :

- Insectes entiers (crus ou transformés, c'est-à-dire séchés, bouillis, rôtis, frits et grillés)
- Pâtes ou poudres (souvent appelé farine) puisque les insectes entiers peuvent être écrasés, broyés et pulvérisés.
- Extraits de protéines, graisses sous forme d'huile, minéraux ou vitamines.

Cependant, la supplémentation des produits alimentaires avec les extraits de ténébrion nécessite une connaissance approfondie des propriétés des protéines extraites. Ces propriétés comprennent, entre autres, le profil des acides aminés, la stabilité thermique, la solubilité, la gélification, la capacité moussante et émulsifiante. À l'heure actuelle, le coût de

l'extraction des protéines est prohibitif. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour poursuivre le développement du procédé et le rendre applicable à l'industrie (1).

En Europe, ce sont surtout les larves de *TM* qui sont consommées, principalement sous forme entières grillées ou sous forme de farine, ce qui permet de dépasser les réticences culturelles à la consommation d'insectes (1).



Figure 31 : Larves de *Tenebrio molitor* grillées prêtes à consommer – source : Aperetik

Après avoir été élevées (ou récoltées), les larves sont tuées par lyophilisation, séchage ou ébullition. Les méthodes de traitement peuvent avoir un effet sur la valeur nutritionnelle des insectes.

Les enjeux de sécurité sont présents tout au long de la chaîne de transformation et de conservation des aliments. Les insectes, comme de nombreux produits alimentaires, sont riches en nutriments et en humidité, offrant un environnement favorable à la survie et à la croissance microbienne (151). Les méthodes de transformation traditionnelles, telles que l'ébullition, le rôtissage et la friture, sont souvent appliquées pour améliorer le goût et la palatabilité des larves de *TM*. Elles ont l'avantage supplémentaire d'améliorer la sécurité microbiologique du produit.

Aux Pays-Bas, le jeûne d'une journée des larves est appliqué pour s'assurer que l'insecte a un intestin vide. L'insecte est ensuite lyophilisé entier ce qui produit un aliment sûr d'une durée de conservation longue (un an), s'il est stocké de manière appropriée dans un endroit frais et sec. Les avantages supplémentaires de la lyophilisation sont le maintien de la valeur nutritive et la capacité du produit à réabsorber l'eau. Néanmoins, des obstacles subsistent : la lyophilisation est coûteuse et entraîne parfois une oxydation indésirable des acides gras insaturés à longue chaîne, diminuant la valeur nutritionnelle du produit et entraînant des odeurs (1). D'autres méthodes de conservation devraient être explorées, telles que l'application de la lumière ultraviolette et des technologies à haute pression, ainsi que des méthodes d'emballage adéquates. D'autres considérations importantes doivent être prises en compte dans le choix de la méthode de conservation : d'une part la capacité à prolonger la

durée de conservation en particulier si de grandes quantités d'insectes doivent être traitées simultanément ; d'autre part la mesure dans laquelle le processus préserve la valeur nutritive des insectes ; et enfin l'acceptabilité culturelle de la méthode de conservation / transformation choisie (1).

Les préférences culturelles et les aspects organoleptiques jouent un rôle important dans le choix des méthodes de conservation. La détermination de méthodes optimales sera un facteur critique dans la commercialisation des insectes. Le taux d'humidité est un critère important de conservation, s'il est trop important, la croissance microbienne peut être accélérée. Les insectes peuvent également être recontaminés pendant le processus de transformation ; pour cette raison, les pratiques d'hygiène pendant le traitement sont d'une grande importance (259). Il est possible d'utiliser la réfrigération qui est recommandée pour les insectes frits et bouillis, ou la congélation. D'autres méthodes de conservation simples telles que l'acidification des insectes avec du vinaigre, la fermentation ou la marinade (dans de la sauce soja ou du vin rouge) ont donné des résultats satisfaisants (151,260).

Afin de garantir la sécurité des aliments, le traitement et le stockage des insectes et de leurs produits doivent être conformes aux mêmes réglementations en matière de santé et d'assainissement que celles applicables à tout autre aliment traditionnel. En raison de leur composition biologique, plusieurs problèmes doivent être pris en compte, tels que la sécurité microbienne, la toxicité, l'appétibilité et la présence de composés inorganiques (1).

1. Risques allergiques

Les études présentées dans le paragraphe « Risques allergies » dans la partie précédente (« Elevage ») sont également valable lors de la fabrication du produit fini (246,254–256). Le risque pour une personne travaillant dans l'industrie du *TM* de déclarer un asthme professionnel n'est pas négligeable. Le risque d'une sensibilisation par inhalation est particulièrement important lors du broyage des insectes. Il est nécessaire de porter un masque pendant toute la durée du traitement.

2. Traitements et risques microbiologiques

La détection potentielle d'agents pathogènes au niveau de l'élevage n'est pas une condition suffisante pour exclure l'introduction d'insectes dans l'alimentation humaine. Dans la chaîne d'élevage, plusieurs étapes au-delà de la production primaire sont en mesure de faire face à la présence pathogène en restaurant les conditions de sécurité, comme cela se produit normalement pour d'autres produits animaux couramment consommés.

Malgré l'absence de critères bien défini et spécifiques pour évaluer la qualité microbiologique des insectes, certaines études récentes menées dans l'UE ont tenté d'utiliser les critères microbiologiques existants pour la viande ou sur les très rares normes définies dans d'autres régions du monde. A titre d'exemple le Kenya a établi des normes (Tableau XI).

Tableau XI : Normes du Kenya et de la Belgique concernant différents contaminants retrouvés dans les produits à base d'insecte (261).

Contaminants	Normes au Kenya
Aérobies mésophiles totaux à 30°C (log ufc/g)	5
<i>Salmonella</i> dans 25g	Absente
<i>Escherichia Coli</i> (log ufc/g)	Moins de 1
<i>Staphylococcus aureus</i> à coagulase positive (log ufc/g)	Moins de 1
<i>Listeria monocytogenes</i> dans 25g	Absente
<i>Cronobacter spp. (Enterobacter sakazakii)</i> dans 10g	Absente
<i>Campylobacter spp.</i> dans 25g	Absente
Levure et moisissures (log ufc/g)	2

a. Fermentation

Il a été démontré que les larves peuvent être fermentées lorsqu'elles sont écrasées en combinaison avec du sel (NaCl), du glucose et du nitrite de sodium (NaNO₂). Opération nécessaire pour obtenir une réduction du pH et pour supprimer les anaérobies sulfito-réducteurs. Cependant l'étude n'a pas précisé la nature des ferments. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer si la fermentation peut prolonger la durée de conservation pendant l'entreposage au froid du produit (260).

Klunder a également étudié l'effet de la fermentation lactique de la farine de sorgho mélangée à 10% ou 20% de poudre de larves et surveillé les charges microbiennes pendant la fermentation. Bien que la croissance d'entérobactéries ait été inhibée par l'environnement acide dans les mélanges de farine, les bactéries sporulées n'ont pas été éliminées, mais sont restées à des niveaux acceptables (< 3 log ufc/g), ce qui montre le bon potentiel de la fermentation pour empêcher la germination et la croissance des bactéries sporulantes (151). *Bacillus licheniformis*, *Bacillus subtilis* et *Bacillus megaterium* ont également été isolés dans de la poudre de larves.

Borremans, Lenaerts, Crauwels, Lievens et Van Campenhout se sont également intéressés à la fermentation. La pâte de larves a fermenté en ajoutant une culture de départ utilisée habituellement pour la viande et composée de *Pediococcus acidilactici*, *Lactobacillus*

curvatus et *Staphylococcus xylosus*. La fermentation lactique s'est également révélée être une méthode utile pour la conservation des insectes car elle inhibe les anaérobies sulfito-réducteurs, principalement en raison de l'acidification rapide de la pâte. En revanche, les anaérobies sulfito-réducteurs restent prédominantes dans les échantillons non inoculés (260).

D'autres auteurs ont pu confirmer que l'acidification lactique inactive les entérobactéries et maintient les bactéries sporulantes restantes stables à des niveaux acceptables où elles ne sont pas en mesure de germer et de se développer (151).

b. Lyophilisation

Une enquête à petite échelle sur le statut microbiologique de plusieurs produits lyophilisés, a révélé que plus de la moitié (59%) des échantillons testés dépassaient le critère d'hygiène du procédé de 106 ufc/g pour les bactéries aérobies dans les matières premières utilisées dans la préparation de la viande. Dans 65% des cas, le niveau de 103 ufc/g pour les entérobactéries dans les matières premières utilisées dans les préparations de viande a également été dépassé. En ce qui concerne les agents pathogènes d'origine alimentaire : *Clostridium perfringens*, *Salmonella spp.* et *Vibrio spp.* n'ont jamais été isolés et *Bacillus cereus* était inférieur à 100 ufc/g dans 93% des échantillons (148). Des dénombrements de bactéries indicatrices avec des nombres supérieurs aux critères d'hygiène du procédé ont également été observés par Stoops. La nécessité de stratégies visant à réduire la contamination par des bactéries ainsi que la nécessité de maintenir les sources de bactéries pathogènes à l'écart des insectes pendant tout le cycle de la production ressortent de cette observation (158). En particulier, il est d'une grande importance de vérifier la qualité microbiologique du substrat. En effet, même si les preuves affirmant la faible survie des bactéries chez les insectes sont confirmées, le substrat pourrait être une source importante de contamination (148).

Caparros Megido et ses collègues ont également démontré des numérations aérobies totales de 4,4 log ufc/g, et inférieur à 1 log ufc/g pour les micromycètes dans les vers de farine lyophilisés. Par conséquent, la lyophilisation peut être efficace pour réduire la contamination microbienne, bien qu'elle n'ait généralement qu'un effet microbiostatique et non un effet microbiocide.

c. Eviscération et traitement thermique

Les recherches actuelles sur les traitements appliqués aux insectes comestibles et leur efficacité pour améliorer la qualité microbienne ont été examinées par Schlüter et son équipe. Le broyage d'insectes entiers augmente généralement la charge microbienne de 1,6 à 2,2 log probablement à cause de la libération et de la dispersion du microbiote intestinal. Par

conséquent, l'éviscération et / ou le traitement thermique des insectes comestibles avant leur consommation est important pour réduire la contamination microbienne (150,151,161). L'éviscération est compliquée chez les larves de *TM*, le traitement thermique paraît plus simple et adapté à des volumes importants de production (1,150).

Klunder et ses collègues ont proposé différents traitements thermiques, tels que l'ébullition, la torréfaction et la friture, pour différentes durées. Ils ont également proposé plusieurs options de stockage, telles que la réfrigération (5-7 °C) et la température ambiante (28-30 °C) pour les larves de vers de farine (151). Ils ont constaté que le traitement le plus efficace pour éliminer complètement les entérobactéries, mais pas les spores, consistait à faire bouillir les larves de vers de farine pendant 10 min. Concernant les spores bactériennes Klunder a suggéré que le traitement thermique pourrait les activer. Elles pourraient alors germer et se développer, entraînant une détérioration et présentant un risque pour la santé humaine (151).

Wynants a testé deux pratiques courantes utilisées dans les installations d'élevage à la fin du cycle d'élevage : la diète totale et le rinçage après la récolte pour vérifier si elles affectent le microbiote des larves de vers de farine. Les insectes ont été affamés pendant 48 heures pour vider leurs intestins puis rincés à l'eau tiède pour éliminer le substrat ou les exuvies (169). Les résultats ont montré que ces procédures seules ou en combinaison n'étaient pas utiles pour réduire les numérations microbiennes ou modifier la composition de la communauté bactérienne des larves, principalement caractérisée par les entérobactéries, les bactéries lactiques, les *Spiroplasma spp.* et une très faible présence de *Listeria spp.*, *Clostridium spp.* et *Bacillus spp.* Ils ont suggéré l'ajout de produits chimiques tel que l'éthanol (70 à 95%) ou du peroxyde d'hydrogène (20%) à l'eau suivi d'un rinçage à l'eau pure ou l'utilisation d'eau chaude pour le rinçage des insectes afin d'améliorer leur qualité microbienne (169).

Vandeweyer, Lenaerts, Callens et Van Campenhout ont étudié l'efficacité du blanchiment (méthode qui consiste à plonger quelques minutes des aliments dans de l'eau bouillante et salée), suivi de la réfrigération ou du séchage aux micro-ondes, pour réduire le nombre de microorganismes dans les larves de *TM*. Ces méthodes ont été explorées comme une alternative à la congélation ou à la lyophilisation, qui sont couramment utilisées à la fin de l'élevage pour tuer les insectes et les préserver, mais qui sont très coûteuses (262). Vandeweyer et Lenaerts ont montré qu'une courte étape de blanchiment à 94 °C de 10 à 40 s était suffisante pour réduire considérablement les charges viables de bactéries mésophiles totales, d'entérobactéries, de bactéries lactiques, de bactéries psychrotrophes et de

champignons, mais pas d'endospores aérobies. Ce résultat était conforme à ceux d'une étude précédente menée par Klunder (151). Lorsque les insectes comestibles ont été conservés par réfrigération, le nombre de microorganismes viables est resté stable pendant 6 jours de stockage. Le séchage par micro-ondes a également été appliqué aux insectes après le blanchiment, et les entérobactéries, les bactéries lactiques et les micromycètes se sont révélés très sensibles à ces traitements, alors que le nombre d'endospores bactériennes n'était que légèrement réduit. Une étape de séchage par micro-ondes a également été appliquée directement aux larves de vers de farine sans étape de blanchiment, ce qui a conduit à une réduction significative du nombre de tous les microorganismes, bien que seule une diminution mineure des endospores bactériennes ait été observée. Ce qui permet d'affirmer que des traitements spécifiques sont nécessaires pour éliminer ce contaminant. (152).

Caparros Megido et ses collègues ont évalué l'effet du blanchiment sur les dénombrements aérobies totaux et le nombre de levures et de moisissures dans des *TM* achetés en Belgique et dans d'autres élevages européens. Ils ont détecté initialement un nombre élevé d'aérobies totales (8,5 log ufc/g) et de levures et moisissures (5,6 log ufc/g). Une étape de blanchiment de 1 à 5 min a été efficace pour réduire la charge microbienne à environ 3-4 log ufc/g. Ces données ont confirmé l'efficacité d'une courte étape de blanchiment pour tuer les cellules végétatives microbiennes (159).

d. Stérilisation

Comme prévu dans l'étude de Caparros Megido et ses collègues, la stérilisation s'est avérée être la meilleure méthode pour réduire les nombres microbiens dans les vers de farine. L'étude de Grabowski et Klein a confirmé la nécessité d'une étape de chauffage avant la consommation d'insectes séchés et en poudre (168). Bien que *Salmonella spp.*, *Listeria monocytogenes*, *Echerichia coli* et *Staphylococcus aureus* étaient absents de tous les échantillons testés, la stérilisation n'est pas une méthode totalement efficace. *Bacillus cereus*, *Serratia liquefaciens*, *Listeria ivanovii*, *Mucor spp.*, *Aspergillus spp.*, *Penicillium spp.* et *Cryptococcus neoformans* étaient présents dans les échantillons séchés et en poudre après stérilisation (152).

e. Marinade

Borremans, Lenaerts, Crauwels, Lievens et Van Campenhout ont proposé la marinade et la fermentation des larves de vers de farine comme méthodes alternatives pour améliorer la durée de vie et la qualité organoleptique (260). Les larves blanchies ont été marinées en les immergeant dans du vin rouge ou de la sauce de soja, puis les numérations microbiennes ont

été contrôlées pendant l'entreposage au froid (5 – 7°C). Une augmentation du nombre total de spores et aérobies d'environ 1 logarithme a été détectée pendant la marinade, mais aucune croissance microbienne n'a été observée pendant le stockage au froid. À la fin de l'entreposage, les numérations viables totales et les spores bactériennes étaient d'environ 3,3 à 3,9 log ufc/g. En revanche, une augmentation des dénombrements totaux à environ 8,0 log ufc/g a été observée pendant le stockage réfrigéré pour les larves qui n'étaient que blanchies. La marinade inhibe la détérioration causée par les microorganismes et prolonge la durée de conservation des insectes pendant au moins 7 jours. Une étude approfondie de la dynamique microbienne au cours de la marinade est nécessaire pour élucider la présence et la croissance possibles de bactéries pathogènes sporulantes.

La stérilisation et la lyophilisation semblent être les méthodes les plus efficaces pour lutter contre la prolifération microbiologique tout en préservant les qualités organoleptiques des aliments issus d'insectes et en prolongeant leurs durées de vie (260). Cependant ces méthodes sont coûteuses et demandent du matériel spécifique. Il en existe de moins coûteuses et plus facile à mettre en œuvre comme la fermentation et la marinade. Associer ces méthodes avec des traitements thermiques permet d'améliorer leurs efficacités (260). En fonction des produits souhaités, la méthode doit être adaptée. A titre d'exemple, pour de la farine de *TM*, la lyophilisation permet de conserver l'aliment pendant 1 an. Les autres méthodes permettent de garder l'animal entier, mais la durée conservation n'est plus que de quelques semaines. Jusqu'à maintenant les niveaux d'acceptation des microorganismes sont ceux utilisés dans l'industrie de la viande. Néanmoins, il est indispensable de réévaluer ces niveaux pour les insectes comestibles.

Peu d'études se sont intéressées à la présence de parasites dans les produits à base de *TM*. Les méthodes de traitement thermique utilisés pour la viande sont efficaces, elles doivent donc être appliquée aux insectes (263).

IV. Consommation

La larve de Ténébrion peut être consommée vivante, (ce qui reste anecdotique) elle a un goût de noisette ou d'amande ; elle est plus souvent consommée cuite, frite à l'huile d'olive ou intégrée dans des préparations sucrées ou salées comme des cakes, gâteaux, biscuits ou quiches, où elle peut remplacer les noix, les raisins, voire les morceaux de chocolat, mais aussi les lardons ou le jambon (246).



Figure 32 : Photos sablés aux fromages et aux ténébrion à gauche et salade de ténébrions à droite - source : recettesinsectes

1. Risque allergique

Une étude s'est intéressée aux risques allergiques potentiellement associés à ce supplément à l'alimentation humaine (264). Les auteurs ont sélectionné des sérums de sujets allergiques à d'autres arthropodes : acariens et crustacés. Les immunoblots avec un extrait protéique de ténébrion mettent en évidence une réactivité croisée avec des allergènes d'acariens et crustacés. Cette réactivité croisée est fonctionnelle car les tests d'activation des basophiles de ces sujets sont positifs vis-à-vis de l'extrait. Les protéines ont été isolées en deux groupes. Les principales sont la chaîne lourde de myosine, des tropomyosines, la troponine, l'arginine kinase, l'alpha-amylase et une protéine sarcoplasmique liant le calcium. La plupart des allergènes sont stables dans le temps (264). Une autre étude a montré la résistance à la digestion des protéines allergéniques croisant avec des allergènes d'acariens et de crevettes (246).

Un premier cas français d'anaphylaxie alimentaire sévère à la larve de *TM* chez une personne allergique aux acariens mais non sensibilisé aux crustacés a été décrit. La crise est intervenue suite à une première ingestion d'une larve de vers de farine cuite et entière. Parmi ces protéines, l' α -amylase et la tubuline sont des panallergènes avec les acariens. Avec la consommation de plus en plus fréquente de vers de farine vient le risque d'une augmentation des cas d'anaphylaxie, en particulier chez les patients allergiques aux acariens. Il est donc urgent d'introduire une réglementation stricte concernant l'étiquetage alimentaire des insectes et des protéines d'insectes (265). Il est nécessaire de mettre en garde les personnes allergiques aux acariens et même aux crustacées, d'une possible allergie croisée.

2. Risques microbiologiques

Une manipulation hygiénique des ténébrions prêt à consommer est importante pour éviter le risque potentiel de recontamination.

Le risque de contamination par la consommation de *TM* est très faible si la réglementation lors de l'élevage, de la transformation et du stockage a été correctement respectée. Néanmoins, comme tout produit issu d'animaux, il est fortement conseillé de faire subir un traitement thermique au produit avant de le consommer, tels que le rôtissage, la friture, etc. Une étude a mis en évidence l'importance d'appliquer un traitement thermique supplémentaire aux insectes sous toutes leurs formes (séchés, fumés, etc.) avant consommation (159). Le risque microbiologique est le plus important lorsque les vers sont consommés crus. (152). La charge microbienne dans les vers crus est décrite dans la partie « Risques microbiologiques » de « Elevage ». La diète totale de 48h et le lavage peuvent se faire sur les vers crus, néanmoins Wynants a montré que ces traitements étaient inefficaces pour réduire la charge (169). Sans études infirmant la conclusion de Wynants, il semble donc trop risquer de consommer des larves de *TM* crues.

La nécessité d'informer les consommateurs sur les bonnes façons de préparer les insectes, même prêts à consommer, est primordiale pour garantir un produit alimentaire microbiologiquement sûr.

Conclusion

Les insectes fournissent des services écosystémiques essentiels. Ils sont aussi une source importante de nourriture. Jusqu'à récemment, les insectes comestibles étaient une ressource apparemment inépuisable. Pourtant, comme la plupart des ressources naturelles, certaines espèces d'insectes comestibles sont en péril. C'est pourquoi, ils sont de plus en plus élevés pour répondre à la croissance de la consommation. Les insectes sont consommés depuis plusieurs millénaires dans le monde entier, en particulier les coléoptères et les orthoptères. Depuis quelques décennies, le monde occidental redécouvre l'entomophagie.

L'entomophagie constituera-t-elle une solution pertinente, garantissant la sécurité alimentaire et la santé des populations ?

Comparée à la consommation conventionnelle de viande de nombreux arguments plaident en faveur de l'entomophagie. Ils sont de nature environnementale, économique et sociale :

- Bioconversion des déchets organiques
- Emission de GES et d'ammoniac faible
- Surface d'élevage réduite
- Amélioration de la sécurité alimentaire : taux de conversion alimentaire élevé
- Faible utilisation d'eau
- Moyens de subsistance pour des populations pauvres

Du point de vue de la santé, il est possible de trouver dans différents insectes l'ensemble des nutriments essentiels à l'humain. Les insectes sont une bonne alternative à la viande conventionnelle par leur richesse en ces nutriments (vitamine B, minéraux, acides gras mono et polyinsaturé, calorie, protéine). Ils s'avèrent une source précieuse pour bon nombre d'éléments dont l'absence est à l'origine de carences grave à travers le monde (leucine, lysine, vitamine B12, zinc et fer). Néanmoins, leur composition nutritionnelle dépend de l'espèce, de leurs stades de développement, de leurs alimentations et de leurs méthodes de préparation. Seule la variété des produits à base d'insectes, peut constituer une réelle avancée dans la substitution à la viande conventionnelle ou apporter des solutions aux carences sévères les plus fréquentes.

L'apparente innocuité des insectes comestibles cache des risques bien réels. Avec le développement de l'entomophagie dans les pays occidentaux, les allergies aux insectes vont augmenter. Une attention particulière devra être accordée à la réactivité croisées (crustacées et acariens).

Les insectes peuvent contenir des microorganismes, en grande partie dans leur microbiote intestinal. Ces pathogènes alimentaires constituent le 2^{ème} risque. Ils sont à surveiller. Parmi ces pathogènes, des bactéries (*Salmonella spp.*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* et *Staphylococcus aureus*), des parasites (*Cryptosporidium spp.*, *Entamoeba histolytica* et des ténias) et des moisissures et levures (*Aspergillus spp.*, *Penicillium spp.* et *Mucor spp.*) sont particulièrement dangereux. Certaines bactéries et moisissures synthétisent des toxines dangereuses pour l'humain. De plus l'adaptation de nouveaux pathogènes à l'humain n'est pas à exclure. Les traitements lors de la transformation en produit alimentaire permettent de diminuer la charge microbienne et rendre consommable ces produits. Cependant, lors de cette étape, une contamination par l'environnement est potentiellement critique. Certaines études ont fait la lumière sur la présence dans les insectes de nombreuses bactéries antibio-résistantes. Des gènes d'antibiorésistances ont également été trouvés chez des insectes comestibles, le risque de transmission de ces gènes à leurs microbiotes est à prendre en compte.

Par ailleurs, des recherches sont nécessaires pour identifier les espèces contenant des substances toxiques (glucosides cyanogéniques ou des anti-nutriments). Les autres dangers préoccupants sont la bioconcentration des métaux lourds et la présence de pesticides dans les insectes comestibles issus de la récolte. L'élevage permet en grande partie de s'affranchir de ces problèmes.

La réponse à ces risques réside dans la mise en œuvre de traitements et de procédures spécifiques de contrôle, à l'instar des pratiques observées pour l'ensemble des produits alimentaires.

Des techniques de conservation et de transformation sont nécessaires pour augmenter la durée de conservation, conserver la qualité et accroître l'acceptabilité des produits alimentaires à base d'insectes. Malgré les nombreux avantages, l'acceptation par les consommateurs reste l'un des principaux obstacles à l'adoption des insectes comme sources viables de protéines dans de nombreux pays occidentaux. Compte tenu des immenses quantités de biomasse d'insectes nécessaires pour remplacer les ingrédients riches en protéines actuels tels que la farine et l'huile de poisson et de soja, des installations d'élevage de masse automatisées qui produisent des produits stables, fiables et sûrs doivent être développées. Le défi pour cette nouvelle industrie sera d'assurer une production rentable et fiable d'une biomasse d'insectes de qualité élevée et constante. Des cadres réglementaires devront être développés. L'étroite collaboration entre les pouvoirs publics, l'industrie et le monde universitaire sera essentielle au développement significatif de l'entomophagie.

Le Doyen de l'UFR de Pharmacie,

Brigitte VENNAT

Le Président du Jury,

Éric Beysac

Bibliographie

1. Van Huis A. Edible insects: future prospects for food and feed security. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2013. 187 p. (FAO forestry paper).
2. Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*. août 2002;418(6898):671-7.
3. Sachs J. Rethinking macroeconomics: knitting together global society. *The Broker*. 2010;10(1):3.
4. Van Lenteren JC. Ecosystem services to biological control of pests: why are they ignored? *PEST CONTROL*. 2006;9.
5. Amar Z. The Eating of Locusts in Jewish Tradition After the Talmudic Period. *The Torah u-Madda Journal*. 2012;
6. Bodenheimer FS. *Insects as Human Food: A Chapter of the Ecology of Man*. Springer Netherlands; 1951. 366 p.
7. Lockwood JA. *Locust: The Devastating Rise and Mysterious Disappearance of the Insect that Shaped the American Frontier*. Basic Books; 2005. 320 p.
8. Holt V. *Why not eat insects?* 1885.
9. Van Huis A. Edible insects are the future? *Proc Nutr Soc*. 2016;75(3):294-305.
10. Van Itterbeeck J, Van Huis A. Environmental manipulation for edible insect procurement: a historical perspective. *J Ethnobiol Ethnomedicine*. 2012;8:3.
11. Barre A, Caze-Subra S, Gironde C, Bienvenu F, Bienvenu J, Rougé P. Entomophagie et risque allergique. *Rev Fr Allergol*. 1 juin 2014;54(4):315-21.
12. Gałęcki R, Sokół R. A parasitological evaluation of edible insects and their role in the transmission of parasitic diseases to humans and animals. *PLoS ONE*. 8 juill 2019;14(7).
13. Vantomme P, Gohler D, NDeckere-Ziangba F. Contribution of forest insects to food security and forest conservation: The example of caterpillars in Central Africa. *ODI Wildl Policy Brief*. 2004;ODI Wildlife Policy Briefing:1-4.
14. Roulon-Doko P. *Chasse, cueillette et cultures chez les Gbaya de Centrafrique*. L'Harmattan; 1998.
15. Durst PB, FAO, éditeurs. *Forest insects as food: humans bite back; proceedings of a workshop on Asia-Pacific resources and their potential for development, 19-21 February 2008, Chiang Mai, Thailand*. Bangkok, Thailand: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Regional Office for Asia and the Pacific; 2010. 231 p. (RAP publication).
16. Yhoun-aree D, Viwatpanich K. Edible insects in the Laos PDR, Myanmar, Thailand, and Vietnam. *Ecol Implic Minilivestock*. 2005;415-40.
17. Yen A, Santander J. Entomophagy and insect conservation: some thoughts for digestion.

18. Ramos-Elorduy B. The importance of edible insects in the nutrition and economy of people of the rural areas of Mexico. *Ecol Food Nutr.* 2010;36:347-66.
19. Milton K. Protein and Carbohydrate Resources of the Maku Indians of Northwestern Amazonia. *Am Anthropol.* 1984;86(1):7-27.
20. Cl J, Zent E, Simpson B. The Importance of Traditional Ecological Knowledge for Palm-weevil Cultivation in the Venezuelan Amazon. *J Ethnobiol.* 2009;29:113-28.
21. Ramos-Elorduy J. *Creepy Crawly Cuisine: The Gourmet Guide to Edible Insects.* Original ed. edition. Rochester, VT: Park Street Press; 1998. 160 p.
22. Van Huis A, Van Gurp H, Dicke M. *The Insect Cookbook: Food for a Sustainable Planet.* Columbia University Press; 2014.
23. Van Huis A. Insects eaten in Africa (Coleoptera, Hymenoptera, Diptera, Heteroptera, Homoptera). *Ecol Implic Minilivestock Potential Insects Role Rodents Frogs Snails Nsects Sustain Dev.* 2005;
24. Latham P. *Edible caterpillars and their food plants of Bas-Congo province, D.R. Congo.* 2016.
25. Stack J, Dorward A, Gondo T, Frost P, Taylor F, Kurebgaseka N. Mopane worm utilisation and rural livelihoods in Southern Africa. *Rural Livelihoods For Biodivers.* 2003;
26. Rastogi N. Provisioning services from ants: food and pharmaceuticals. *Asian Myrmecol.* 2011;19.
27. Van Huis A. Insects as Food in sub-Saharan Africa. *Int J Trop Insect Sci.* 2003;23(3):163-85.
28. Yen AL. Insect and other invertebrate foods of the Australian aborigines. *Ecol Implic Minilivestock.* 2005;367-87.
29. Ramos-Elorduy J, Moreno JMP, Camacho VHM. Edible aquatic Coleoptera of the world with an emphasis on Mexico. *J Ethnobiol Ethnomedicine.* 2009;5:11.
30. Cerda H, Martinez R, Briceno N, Pizzoferrato L, Manzi P, Ponzetta MT, et al. Palm worm: (*Rhynchophorus palmarum*) traditional food in Amazonas, Venezuela—nutritional composition, small scale production and tourist palatability. *Ecol Food Nutr.* 2001;40(1):13-32.
31. Haocheng. Mealworms, Superworms, Fly prepupae - Haocheng Mealworm Inc of China [Internet]. HaoCheng Mealworms Inc. website. [cité 25 août 2020]. Disponible sur: <http://www.hcmealworm.com/>
32. Flood J. *The moth hunters: Aboriginal prehistory of the Australian Alps.* 1980.
33. Malaisse F. *Se nourrir en forêt claire africaine: Approche écologique et nutritionnelle.* 1997.

34. FAO. State of Forest and Tree Genetic Resources in Dry Zone Southern Africa Development Community Countries [Internet]. FAO. 2003 [cité 25 août 2020]. Disponible sur: <http://www.fao.org/3/ac850e/ac850e00.htm>
35. Illgner P, Nel E. The Geography of Edible Insects in Sub-Saharan Africa: a study of the Mopane Caterpillar. *Geogr J.* 2000;166(4):336-51.
36. Ghazoul J. Mopani woodlands and the mopane worm: enhancing rural livelihoods and resource sustainability. Final technical report. Lond DFID. 2006;21.
37. Van Mele P. A historical review of research on the weaver ant *Oecophylla* in biological control. *Agric For Entomol.* 2008;10(1):13-22.
38. Shen L, Li D, Feng F, Ren Y. Nutritional composition of *Polyrhachis vicina* Roger (Edible Chinese black ant). *Songklanakarin J Sci Technol.* 2006;(28):107-14.
39. Saeed T, Dagga F, Saraf M. Analysis of residual pesticides present in edible locusts captured in Kuwait. *Arab Gulf J Sci Res.* 1993;11:1-5.
40. Cohen JH, Sáánchez NDM, Montiel-Ishino F. Chapulines and Food Choices in Rural Oaxaca. *Gastronomica.* 2009;9(1):61-5.
41. Cerritos R, Cano-Santana Z. Harvesting grasshoppers *Sphenarium purpurascens* in Mexico for human consumption: A comparison with insecticidal control for managing pest outbreaks. *Crop Prot.* 2008;27(3):473-80.
42. Van Huis A. Medical and stimulating properties ascribed to arthropods and their products in sub-saharan Africa. In: *Les insectes dans la tradition orale - Insects in Oral Literature and Traditions.* Leuven: Peeters; 2002. p. 367-82.
43. Parsons JR. The Pastoral Niche in Pre-Hispanic Mesoamerica. In: Staller J, Carrasco M, éditeurs. *Pre-Columbian Foodways: Interdisciplinary Approaches to Food, Culture, and Markets in Ancient Mesoamerica.* New York, NY: Springer; 2010. p. 109-36.
44. Feng Y, Chen X-M, Zhao M, He Z, Sun L, Wang C-Y, et al. Edible insects in China: Utilization and prospects. *Insect Sci.* 2018;25(2):184-98.
45. Makuku SJ. All this for a bug! Community approaches to common property resources management. The case of the Norumedzo community in Bikita, Zimbabwe. 1993;
46. Kinyuru JN, Kenji GM, Njoroge MS. Process development, nutrition and sensory qualities of wheat buns enriched with edible termites (*Macrotermes subhylanus*) from Lake Victoria region, Kenya. *Afr J Food Agric Nutr Dev.* 2009;9(8).
47. Zhang C-X, Tang X-D, Cheng J-A. The utilization and industrialization of insect resources in China. *Entomol Res.* 2008;38(s1):S38-47.
48. Sirimungkararat S, Weerasak S, Nopparat T, Natongkham A. Edible products from eri and mulberry silkworms in Thailand. For *Insects Food Hum Bite Back 2010*

49. Lee G, Bae H. Anti-Inflammatory Applications of Melittin, a Major Component of Bee Venom: Detailed Mechanism of Action and Adverse Effects. *Mol Basel Switz.* 11 mai 2016;21(5).
50. Yen AL. Short-range endemism and Australian Psylloidea (Insecta : Hemiptera) in the genera *Glycaspis* and *Acizzia* (Psyllidae). *Invertebr Syst.* 2002;16(4):631-9.
51. Mariod A, Matthäus B, Eichner K. Fatty Acid, Tocopherol and Sterol Composition as Well as Oxidative Stability of Three Unusual Sudanese Oils. *J Food Lipids.* 2004;11(3):179-89.
52. Mustafa NEM, Mariod AA, Matthäus B. Antibacterial Activity of *Aspongopus Viduatus* (melon Bug) Oil. *J Food Saf.* 2008;28(4):577-86.
53. Mariod A, Matthäus B, Eichner K, Hussein IH. Improving the Oxidative Stability of Sunflower Oil by Blending with *Sclerocarya Birrea* and *Aspongopus Viduatus* Oils. *J Food Lipids.* 2005;12(2):150-8.
54. Monzenga Lokela J-C. *Ecologie appliquée de Rhynchophorus phoenicis Fabricius (Dryophthoridae : Coleoptera) : phénologie et optimisation des conditions d'élevage à Kisangani, R.D.Congo.* Université Catholique de Louvain; 2015.
55. Durst PB, Hanboonsong Y. Small-scale production of edible insects for enhanced food security and rural livelihoods: experience from Thailand and Lao People's Democratic Republic. *J Insects Food Feed.* 2015;1(1):25-31.
56. Veldkamp T. *Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets - a feasibility study.* 2012;
57. Gerber PJ, Food and Agriculture Organization of the United Nations, éditeurs. *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities.* Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2013. 115 p.
58. Beusen AHW, Bouwman AF, Heuberger PSC, Van Drecht G, Van Der Hoek KW. Bottom-up uncertainty estimates of global ammonia emissions from global agricultural production systems. *Atmos Environ.* 2008;42(24):6067-77.
59. Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M, de Haan C. *Livestock's long shadow.* FAO. 2006;
60. IPCC. *AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [Internet]. 2017 [cité 2 sept 2020]. Disponible sur: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>
61. Hackstein JH, Stumm CK. Methane production in terrestrial arthropods. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 1994;91(12):5441-5.
62. Egert M, Wagner B, Lemke T, Brune A, Friedrich MW. Microbial Community Structure in Midgut and Hindgut of the Humus-Feeding Larva of *Pachnoda ehippiata* (Coleoptera: Scarabaeidae). *Appl Environ Microbiol.* 2003;69(11):6659-68.

63. Oonincx DGAB, van Itterbeeck J, Heetkamp MJW, van den Brand H, van Loon JJA, van Huis A. An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption. *PLoS One*. 2010;5(12):e14445.
64. Aarnink AJA, Keen A, Metz JHM, Speelman L, Verstegen MWA. Ammonia Emission Patterns during the Growing Periods of Pigs Housed on Partially Slatted Floors. *J Agric Eng Res*. 1995;62(2):105-16.
65. Oonincx D, Boer IJM de. Environmental Impact of the Production of Mealworms as a Protein Source for Humans – A Life Cycle Assessment. *PLOS ONE*. 2012;7(12):e51145.
66. Brambell FW. Report of the technical committee to enquire into the welfare of animals kept under intensive livestock husbandry systems. In 1965.
67. De Goede DM, Erens J, Kapsomenou E, Peters M. Large scale insect rearing and animal welfare. In: Röcklinsberg H, Sandin P, éditeurs. *The ethics of consumption: The citizen, the market and the law*. Wageningen: Academic Publishers; 2013. p. 236-42.
68. Eisemann CH, Jorgensen WK, Merritt DJ, Rice MJ, Cribb BW, Webb PD, et al. Do insects feel pain? — A biological view. *Experientia*. 1984;40(2):164-7.
69. FAO. State of the World's Forests 2012. 2012 [cité 2 sept 2020]; Disponible sur: <http://www.fao.org/3/i3010e/i3010e00.htm>
70. Muafor FJ, Gnetegha AA, Le Gall P, Levang P. Exploitation, trade and farming of palm weevil grubs in Cameroon. Center for International Forestry Research (CIFOR); 2015.
71. Dzerefos CM, Witkowski ETF. Crunchtime: sub-Saharan stinkbugs, a dry season delicacy and cash cow for impoverished rural communities. *Food Secur*. 2015;7(4):919-25.
72. Randrianandrasana M, Berenbaum M. Edible Non-Crustacean Arthropods in Rural Communities of Madagascar. *J Ethnobiol*. 2015;
73. AFSCA. Mise sur le marché d'insectes et de denrées à base d'insectes pour la consommation humaine [Internet]. 2019 [cité 2 sept 2020]. Disponible sur: <http://www.favv.be/denreesalimentaires/insectes/default.asp>
74. EFSA. Guidance on novel foods [Internet]. European Food Safety Authority. 2016 [cité 2 sept 2020]. Disponible sur: <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/4594>
75. Raheem D, Raposo A, Oluwole OB, Nieuwland M, Saraiva A, Carrascosa C. Entomophagy: Nutritional, ecological, safety and legislation aspects. *Food Res Int Ott Ont*. 2019;126:108672.
76. ONU. L'alimentation [Internet]. 2018 [cité 4 sept 2020]. Disponible sur: <https://www.un.org/fr/sections/issues-depth/food/index.html>
77. Ramos-Elorduy J. Insects: A sustainable source of food? *Ecol Food Nutr*. 1 sept 1997;36(2-4):247-76.

78. Oonincx DG a. B, Poel AFB van der. Effects of diet on the chemical composition of migratory locusts (*Locusta migratoria*). *Zoo Biol.* 2011;30(1):9-16.
79. FAO, INFOODS. Composition database for Biodiversity. FAO / INFOODS [Internet]. 2013 [cité 4 sept 2020]; Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/285537081_FAOINFOODS_Food_Composition_Database_for_Biodiversity_Version_21_-_BioFoodComp21
80. Chizzolini R, Zanardi E, Dorigoni V, Ghidini S. Calorific value and cholesterol content of normal and low-fat meat and meat products. *Trends Food Sci Technol.* avr 1999;10(4-5):119-28.
81. Etiosa OR, Chika NB, Benedicta A. Mineral and Proximate Composition of Soya Bean. *Asian J Phys Chem Sci.* 2017;1-6.
82. Pal P, Roy S. Edible Insects: Future of Human Food - A Review. Vol. 26, *International Letters of Natural Sciences.* SciPress Ltd; 2014. p. 1-11.
83. Alves AV, Freitas de Lima F, Granzotti da Silva T, Oliveira VS de, Kassuya CAL, Sanjinez-Argandoña EJ. Safety evaluation of the oils extracted from edible insects (*Tenebrio molitor* and *Pachymerus nucleorum*) as novel food for humans. *Regul Toxicol Pharmacol.* 2019;102:90-4.
84. Finke MD, Oonincx D. Chapter 17 - Insects as Food for Insectivores. In: Morales-Ramos JA, Rojas MG, Shapiro-Ilan DI, éditeurs. *Mass Production of Beneficial Organisms.* San Diego: Academic Press; 2014. p. 583-616.
85. Bosch G, Zhang S, Oonincx DGAB, Hendriks WH. Protein quality of insects as potential ingredients for dog and cat foods. *J Nutr Sci.* 25 sept 2014;3.
86. Manditsera FA, Luning PA, Fogliano V, Lakemond CMM. The contribution of wild harvested edible insects (*Eulepida mashona* and *Henicus whellani*) to nutrition security in Zimbabwe. *J Food Compos Anal.* 1 janv 2019;75:17-25.
87. Manditsera FA, Luning PA, Fogliano V, Lakemond CMM. Effect of domestic cooking methods on protein digestibility and mineral bioaccessibility of wild harvested adult edible insects. *Food Res Int.* 1 juill 2019;121:404-11.
88. Yi L, Lakemond CMM, Sagis LMC, Eisner-Schadler V, van Huis A, van Boekel MAJS. Extraction and characterisation of protein fractions from five insect species. *Food Chem.* 15 déc 2013;141(4):3341-8.
89. Ademolu KO, Idowu AB, Olatunde GO. Nutritional Value Assessment of Variegated Grasshopper, *Zonocerus variegatus* (L.) (Acridoidea: Pygomorphidae), During Post-Embryonic Development. *Afr Entomol.* mars 2010;18(2):360-4.
90. Bukkens SGF. Insects in the human diet: Nutritional aspects. *N H Sci Publ.* 2005;

91. Sogbesan AO, Ugwumba AAA. Nutritional Evaluation of Termite (*Macrotermes subhyalinus*) Meal as Animal Protein Supplements in the Diets of *Heterobranchus longifilis* (Valenciennes, 1840) Fingerlings. 2008;9.
92. Rumpold BA, Schlüter OK. Nutritional composition and safety aspects of edible insects. *Mol Nutr Food Res*. 2013;57(5):802-23.
93. Womeni HM, Linder M, Tiencheu B, Mbiapo FT, Villeneuve P, Fanni J, et al. Oils of insects and larvae consumed in Africa: potential sources of polyunsaturated fatty acids. *Ol Corps Gras Lipides*. 1 juill 2009;16(4-5-6):230-5.
94. Michaelsen KF, Hoppe C, Roos N, Kaestel P, Stougaard M, Lauritzen L, et al. Choice of Foods and Ingredients for Moderately Malnourished Children 6 Months to 5 Years of Age. *Food Nutr Bull*. sept 2009;30(3_suppl3):S343-404.
95. Okaraonye C, Ikewuchi J. *Rhynchophorus phoenicis* (F) Larva Meal: Nutritional Value and Health Implications. *Sci Alert*. 2008;
96. Banjo A, Lawal O, Adeyemi A. The Microbial Fauna Associated with the Larvae of *Oryctes Monocerus*. *J Appl Sci Res*. 2006;2.
97. Feng Ying, Chen Yong, Wang Shaoyun,, Ye Shoude,. The common edible insects of hemiptera and their nutritive value. *Eur PMC*. :2000.
98. Nzikou J. Characterisation and Nutritional Potentials of *Rhynchophorus phoenic* Larva Consumed in Congo-Brazzaville | Request PDF. *Curr Res J Biol Sci*. 2010;
99. Vogel G. For More Protein, Filet of Cricket. *Science*. 2010;327(5967):811-811.
100. Ekpo K, Onigbinde A. Nutritional Potentials of the Larva of *Rhynchophorus phoenicis*. *Pak J Nutr*. 2005;4(5):287-90.
101. Montowska M, Kowalczewski PŁ, Rybicka I, Fornal E. Nutritional value, protein and peptide composition of edible cricket powders. *Food Chem*. 2019;289:130-8.
102. Zarkadas CG, Marshall WD, Khalili AD, Nguyen Q, Zarkadas GC, Karatzas CN, et al. Mineral Composition of Selected Bovine, Porcine and Avian Muscles, and Meat Products. *J Food Sci*. 1987;52(3):520-5.
103. Nowak V, Persijn D, Rittenschober D, Charrondiere UR. Review of food composition data for edible insects. *Food Chem*. févr 2016;193:39-46.
104. Banjo AD, Lawal OA, Songonuga EA. The nutritional value of fourteen species of edible insects in southwestern Nigeria. *Afr J Biotechnol*. 2006;5(3):298-301.
105. Latunde-Dada GO, Yang W, Vera Aviles M. In Vitro Iron Availability from Insects and Sirloin Beef. *J Agric Food Chem*. 2016;64(44):8420-4.
106. FAO, OMS. Human Vitamin and Mineral Requirements. FAO. 2002;

107. Stabler SP, Allen RH. Vitamin B12 Deficiency as a Worldwide Problem. *Annu Rev Nutr.* 2004;24(1):299-326.
108. Oh RC, Brown DL. Vitamin B12 Deficiency. *Am Fam Physician.* 2003;67(5):979-86.
109. Tong L, Yu X, Liu H. Insect food for astronauts: gas exchange in silkworms fed on mulberry and lettuce and the nutritional value of these insects for human consumption during deep space flights. *Bull Entomol Res.* 2011;101(5):613-22.
110. Finke MD. Estimate of chitin in raw whole insects. *Zoo Biol.* 2007;26(2):105-15.
111. Stull VJ, Finer E, Bergmans RS, Febvre HP, Longhurst C, Manter DK, et al. Impact of Edible Cricket Consumption on Gut Microbiota in Healthy Adults, a Double-blind, Randomized Crossover Trial. *Sci Rep.* 2018;8(1):10762.
112. Pimentel D, Pimentel M. Sustainability of meat-based and plant-based diets and the environment. *Am J Clin Nutr.* 2003;78(3 Suppl):660S-663S.
113. Smil V. Worldwide transformation of diets, burdens of meat production and opportunities for novel food proteins. *Enzyme Microb Technol.* 2002;30(3):305-11.
114. Collavo A, Glew R, Huang Y-S, Chuang L, Bosse R, Paoletti M. Housecricket smallscale farming. In 2005.
115. Nakagaki BJ, Defoliart GR. Comparison of Diets for Mass-Rearing *Acheta domesticus* (Orthoptera: Gryllidae) as a Novelty Food, and Comparison of Food Conversion Efficiency with Values Reported for Livestock. *J Econ Entomol.* 1991;84(3):891-6.
116. Martin RM, Gunnell D, Smith GD. Breastfeeding in infancy and blood pressure in later life: systematic review and meta-analysis. *Am J Epidemiol.* 1 janv 2005;161(1):15-26.
117. Semproli S, Gualdi-Russo E. Childhood malnutrition and growth in a rural area of Western Kenya. *Am J Phys Anthropol.* mars 2007;132(3):463-9.
118. Paoletti MG, Dufour DL, Cerda H, Torres F, Pizzoferrato L, Pimentel D. The importance of leaf- and litter-feeding invertebrates as sources of animal protein for the Amazonian Amerindians. *Proc R Soc B Biol Sci.* 2000;267(1459):2247-52.
119. FAO. INFOODS [Internet]. [cité 5 sept 2020]. Disponible sur: <http://www.fao.org/infoods/infoods/en/>
120. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Fisheries and Aquaculture Department. The state of world fisheries and aquaculture 2012. Rome; London: Food and Agriculture Organization of the United Nations ; Eurospan [distributeur]; 2012.
121. Pimentel D, Berger B, Filiberto D, Newton M, Wolfe B, Karabinakis E, et al. Water Resources: Agricultural and Environmental Issues. *BioScience.* 2004;54(10):909-18.
122. Chapagain A, Hoekstra A. Virtual Water Flows Between Nations in Relation to Trade in Livestock and Livestock Products. *Proc Int Expert Meet Virtual Water Trade.* 2003;

123. Siemianowska E, Kosewska A, Aljewicz M, Skibniewska KA. Larvae of mealworm (*Tenebrio molitor* L.) as European novel food. *Agric Sci.* 2013;
124. Ghaly AE, Alkoik FN. The Yellow Mealworm as a Novel Source of Protein. *Am J Agric Biol Sci.* 2009;4(4):319-31.
125. Murray DRP. The Importance of Water in the Normal Growth of Larvae of *Tenebrio Molitor*. *Entomol Exp Appl.* 1968;11(2):149-68.
126. Miglietta PP, De Leo F, Ruberti M, Massari S. Mealworms for Food: A Water Footprint Perspective. *Water.* 2015;7(11):6190-203.
127. Choi G-S, Shin YS, Kim JE, Ye Y-M, Park H-S. Five cases of food allergy to vegetable worm (*Cordyceps sinensis*) showing cross-reactivity with silkworm pupae. *Allergy.* 2010;65(9):1196-7.
128. Mäkinen-Kiljunen S, Mussalo-Rauhamaa H, Petman L, Rinne J, Haahtela T. A baker's occupational allergy to flour moth (*Ephestia kuehniella*). *Allergy.* 2001;56(7):696-700.
129. Linares T, Hernandez D, Bartolome B. Occupational rhinitis and asthma due to crickets. *Ann Allergy Asthma Immunol.* 2008;100(6):566-9.
130. Netgen. Allergologie [Internet]. *Revue Médicale Suisse.* [cité 31 juill 2020]. Disponible sur: <https://www.revmed.ch/RMS/2013/RMS-368/Allergologie3>
131. Greenhawt MJ, Baldwin JL. Carmine dye and cochineal extract: hidden allergens no more. *Ann Allergy Asthma Immunol.* 2009;103(1):73-5.
132. Chung K, Baker JR, Baldwin JL, Chou A. Identification of carmine allergens among three carmine allergy patients. *Allergy.* 2001;56(1):73-7.
133. Wüthrich B, Kägi MK, Stücker W. Anaphylactic reactions to ingested carmine (E120). *Allergy.* 1997;52(11):1133-7.
134. Chen PP. Honey Bees and other Edible Insects Used as Human Food in Thailand. *Am Entomol.* 1998;
135. Liu X, Zhang J, Zhu KY. Chitin in Arthropods: Biosynthesis, Modification, and Metabolism. *Adv Exp Med Biol.* 2019;1142:169-207.
136. Elieh Ali Komi D, Sharma L, Dela Cruz CS. Chitin and Its Effects on Inflammatory and Immune Responses. *Clin Rev Allergy Immunol.* 2018;54(2):213-23.
137. Muzzarelli RAA. Chitins and Chitosans as Immunoadjuvants and Non-Allergenic Drug Carriers. *Mar Drugs.* 2010;8(2):292-312.
138. Brinchmann BC, Bayat M, Brøgger T, Muttuvelu DV, Tjønneland A, Sigsgaard T. A possible role of chitin in the pathogenesis of asthma and allergy. *Ann Agric Environ Med AAEM.* 2011;18(1):7-12.

139. Da Silva CA, Hartl D, Liu W, Lee CG, Elias JA. TLR-2 and IL-17A in chitin-induced macrophage activation and acute inflammation. *J Immunol Baltim Md 1950*. 2008;181(6):4279-86.
140. Barre A, Caze-Subra S, Gironde C, Bienvenu F, Bienvenu J, Rougé P. Entomophagie et risque allergique. *Rev Fr Allergol*. 2014;54(4):315-21.
141. Srinroch C, Srisomsap C, Chokchaichamnankit D, Punyarit P, Phiriyangkul P. Identification of novel allergen in edible insect, *Gryllus bimaculatus* and its cross-reactivity with *Macrobrachium* spp. allergens. *Food Chem*. 2015;184:160-6.
142. Chen J, Jia J, Qin Z. A Weighted Mean Subtractive Clustering Algorithm. *Inf Technol J*. :2008.
143. Broekman H, Verhoeckx KC, den Hartog Jager CF, Kruizinga AG, Pronk-Kleinjan M, Remington BC, et al. Majority of shrimp-allergic patients are allergic to mealworm. *J Allergy Clin Immunol*. 2016;137(4):1261-3.
144. Francis F, Doyen V, Debaugnies F, Mazzucchelli G, Caparros R, Alabi T, et al. Limited cross reactivity among arginine kinase allergens from mealworm and cricket edible insects. *Food Chem*. 2019;276:714-8.
145. Jeong KY, Han I-S, Lee JY, Park KH, Lee J-H, Park J-W. Role of tropomyosin in silkworm allergy. *Mol Med Rep*. 2017;15(5):3264-70.
146. Bienvenu F, Barre A, Viel S, Garnier L, Guyon C, Favre-Metz C, et al. Les défensines : des allergènes végétaux importants ? *Rev Fr Allergol*. 2013;53(7):585-90.
147. Jin KL, Pak JH, Park J-Y, Choi WH, Lee J-Y, Kim J-H, et al. Expression profile of histone deacetylases 1, 2 and 3 in ovarian cancer tissues. *J Gynecol Oncol*. 2008;19(3):185-90.
148. Belluco S, Mantovani A, Ricci A. Edible Insects in a Food Safety Perspective. In: *Edible Insects in Sustainable Food Systems*. Cham: Springer International Publishing; 2018. p. 109-26.
149. Slingenbergh JI, Gilbert M, de Balogh KI, Wint W. Ecological sources of zoonotic diseases. *Rev Sci Tech Int Off Epizoot*. 2004;23(2):467-84.
150. Schlüter O, Rumpold B, Holzhauser T, Roth A, Vogel RF, Quasigroch W, et al. Safety aspects of the production of foods and food ingredients from insects. *Mol Nutr Food Res*. 2017;61(6).
151. Klunder HC, Wolkers-Rooijackers J, Korpela JM, Nout MJR. Microbiological aspects of processing and storage of edible insects. *Food Control*. 2012;26(2):628-31.
152. Garofalo C, Milanović V, Cardinali F, Aquilanti L, Clementi F, Osimani A. Current knowledge on the microbiota of edible insects intended for human consumption: A state-of-the-art review. *Food Res Int*. 2019;125:108527.

153. Hou L, Shi Y, Zhai P, Le G. Inhibition of foodborne pathogens by Hf-1, a novel antibacterial peptide from the larvae of the housefly (*Musca domestica*) in medium and orange juice. *Food Control*. 2007;18(11):1350-7.
154. Camargo AC, Cossi MVC, Silva WP da, Bersot LDS, Landgraf M, Baranyi J, et al. Microbiological Testing for the Proper Assessment of the Hygiene Status of Beef Carcasses. *Microorganisms*. 2019;7(3).
155. BuRO. Office for Risk Assessment & Research - About us - NVWA-English [Internet]. Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit; 2019 [cité 26 août 2020]. Disponible sur: <https://english.nvwa.nl/about-us/office-for-risk-assessment--research>
156. SHC FASFC. FASFC, 2014. Voedselveiligheid Van Insecten Bestemd Voor Humane Consumptie (Dossier SciCom 2014/04-HGR 9160). [Internet]. 2014 [cité 26 août 2020]. Disponible sur: <https://limo.libis.be/primo-explore/fulldisplay/LIRIAS1673583/Lirias>
157. Fasolato L, Cardazzo B, Carraro L, Fontana F, Novelli E, Balzan S. Edible processed insects from e-commerce: Food safety with a focus on the *Bacillus cereus* group. *Food Microbiol*. 2018;76:296-303.
158. Stoops J, Crauwels S, Waud M, Claes J, Lievens B, Van Campenhout L. Microbial community assessment of mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) and grasshoppers (*Locusta migratoria migratorioides*) sold for human consumption. *Food Microbiol*. 2016;53(Pt B):122-7.
159. Caparros Megido R, Desmedt S, Blecker C, Béra F, Haubruge É, Alabi T, et al. Microbiological Load of Edible Insects Found in Belgium. *Insects*. 2017;8(1):12.
160. Vandeweyer D, Crauwels S, Lievens B, Van Campenhout L. Microbial counts of mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) and crickets (*Acheta domesticus* and *Gryllobes sigillatus*) from different rearing companies and different production batches. *Int J Food Microbiol*. 2017;242:13-8.
161. Garofalo C, Osimani A, Milanović V, Taccari M, Cardinali F, Aquilanti L, et al. The microbiota of marketed processed edible insects as revealed by high-throughput sequencing. *Food Microbiol*. 2017;62:15-22.
162. Walia K, Kapoor A, Farber JM. Qualitative risk assessment of cricket powder to be used to treat undernutrition in infants and children in Cambodia. *Food Control*. 2018;92:169-82.
163. Osimani A, Garofalo C, Milanović V, Taccari M, Cardinali F, Aquilanti L, et al. Insight into the proximate composition and microbial diversity of edible insects marketed in the European Union. *Eur Food Res Technol*. 2017;243(7):1157-71.
164. Vandeweyer D, Crauwels S, Lievens B, Van Campenhout L. Metagenetic analysis of the bacterial communities of edible insects from diverse production cycles at industrial rearing companies. *Int J Food Microbiol*. 2017;261:11-8.

165. Ssepunya G, Wynants E, Verreth C, Crauwels S, Lievens B, Claes J, et al. Microbial characterisation of the edible grasshopper *Ruspolia differens* in raw condition after wild-harvesting in Uganda. *Food Microbiol.* 2019;77:106-17.
166. Osimani A, Milanović V, Garofalo C, Cardinali F, Roncolini A, Sabbatini R, et al. Revealing the microbiota of marketed edible insects through PCR-DGGE, metagenomic sequencing and real-time PCR. *Int J Food Microbiol.* 2018;276:54-62.
167. Milanović V, Osimani A, Roncolini A, Garofalo C, Aquilanti L, Pasquini M, et al. Investigation of the Dominant Microbiota in Ready-to-Eat Grasshoppers and Mealworms and Quantification of Carbapenem Resistance Genes by qPCR. *Front Microbiol.* 2018;9.
168. Grabowski NTh, Klein G. Microbiology of processed edible insect products – Results of a preliminary survey. *Int J Food Microbiol.* 2017;243:103-7.
169. Wynants E, Crauwels S, Lievens B, Luca S, Claes J, Borremans A, et al. Effect of post-harvest starvation and rinsing on the microbial numbers and the bacterial community composition of mealworm larvae (*Tenebrio molitor*). *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2017;42:8-15.
170. Grabowski NTh, Klein G. Bacteria encountered in raw insect, spider, scorpion, and centipede taxa including edible species, and their significance from the food hygiene point of view. *Trends Food Sci Technol.* 2017;63:80-90.
171. Igbabul BD, Agude C, Inyang CU. Nutritional and Microbial Quality of Dried Larva of *Cirina forda*. *Int J Nutr Food Sci.* 2015;3(6):602.
172. Ebenebe CI, Okpoko VO. Microbiological quality of raw and roasted African palm weevil (*Rhynchophorus phoenicis*) consumed in the south eastern Nigeria. *Anim Res Int.* 2015;12(2):2159-65.
173. Ali A, Mohamadou BA, Saidou C, Aoudou Y, Tchiegang C. Physico-Chemical Properties and Safety of Grasshoppers, Important Contributors to Food Security in the Far North Region of Cameroon. *Res J Anim Sci.* 2010;4(5):108-11.
174. fcd. Critères microbiologiques applicables à partir de 2020 aux marques de distributeurs, marques premiers prix et matières premières dans leur conditionnement initial industriel [Internet]. fcd. 2019. Disponible sur: http://www.fcd.fr/media/filer_public/37/fd/37fd2d16-85a6-4059-acc4-c876bc023dc4/fcd_criteres_microbiologiques_2020_produits_ls_mp_vdef_15112019.pdf
175. Caniça M, Manageiro V, Jones-Dias D, Clemente L, Gomes-Neves E, Poeta P, et al. Current perspectives on the dynamics of antibiotic resistance in different reservoirs. *Res Microbiol.* 2015;166(7):594-600.
176. Clementi F, Aquilanti L. Recent investigations and updated criteria for the assessment of antibiotic resistance in food lactic acid bacteria. *Anaerobe.* 2011;17(6):394-8.

177. Zurek L, Ghosh A. Insects Represent a Link between Food Animal Farms and the Urban Environment for Antibiotic Resistance Traits. *Appl Environ Microbiol.* 2014;80(12):3562-7.
178. Marshall DL, Dickson JS, Nguyen NH. Chapter 8 - Ensuring Food Safety in Insect Based Foods: Mitigating Microbiological and Other Foodborne Hazards. In: Dossey AT, Morales-Ramos JA, Rojas MG, éditeurs. *Insects as Sustainable Food Ingredients.* San Diego: Academic Press; 2016. p. 223-53.
179. Osimani A, Garofalo C, Aquilanti L, Milanović V, Cardinali F, Taccari M, et al. Transferable Antibiotic Resistances in Marketed Edible Grasshoppers (*Locusta migratoria migratorioides*). *J Food Sci.* 2017;82(5):1184-92.
180. Osimani A, Cardinali F, Aquilanti L, Garofalo C, Roncolini A, Milanović V, et al. Occurrence of transferable antibiotic resistances in commercialized ready-to-eat mealworms (*Tenebrio molitor* L.). *Int J Food Microbiol.* 2017;263:38-46.
181. Vandeweyer D, Milanović V, Garofalo C, Osimani A, Clementi F, Van Campenhout L, et al. Real-time PCR detection and quantification of selected transferable antibiotic resistance genes in fresh edible insects from Belgium and the Netherlands. *Int J Food Microbiol.* 2019;290:288-95.
182. Gałęcki R, Sokół R. *Cryptosporidium canis* and *C. felis* as a potential risk to humans. 2015;11.
183. Panciera RJ, Thomassen RW, Garner FM. Cryptosporidial Infection in a Calf. *Vet Pathol.* 1971;8(5-6):479-84.
184. Graczyk TK, Bixler H, Fayer R, Cranfield MR. House flies (*Musca domestica*) as transport hosts of *Cryptosporidium parvum*. | *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene.* 1999;61:500-4.
185. Graczyk TK, Knight R, Gilman RH, Cranfield MR. The role of non-biting flies in the epidemiology of human infectious diseases. *Microbes Infect.* 2001;3(3):231-5.
186. Tاتفeng YM, Usuanlele MU, Orukpe A, Digban AK, Okodua M, Oviasogie F, et al. Mechanical transmission of pathogenic organisms: the role of cockroaches. *J Vector Borne Dis.* 2005;7.
187. Golemansky VG, Lipa J, Pilarska DK, Todorov MT. Unicellular parasites (Protozoa: Eugregarinida, Microsporida, Trychostomatida) of the orthopterous insects (Insecta: Orthoptera) in Bulgaria. *Acta Zool Bulg.* 1998;50(1):123-35.
188. Boucias DG, Pendland JC. *Principles of Insect Pathology.* Springer Science & Business Media; 2012. 558 p.
189. Adeleke MA, Akatah HA, Hassan AO, Sam-Wobo SO, Famodimu TM, Olatunde GO, et al. Implication of cockroaches as vectors of gastrointestinal parasites in parts of Osogbo, southwestern Nigeria. 2012;7(2).

190. Khan AR, Huq F. Disease agents carried by flies in Dacca city. Bangladesh Med Res Counc Bull. 1978;4(2):86-93.
191. Chamavit P, Sahaisook P, Niamnuay N. The majority of cockroaches from the Samutprakarn province of Thailand are carriers of parasitic organisms. EXCLI J. 2011;10:218-22.
192. Luttermoser GW. Meal Beetle Larvae as Intermediate Hosts of the Poultry Tapeworm *Raillietina cesticillus*. Poult Sci. 1940;19(3):177-9.
193. Heyneman D, Voge M. Host response of the flour beetle, *Tribolium confusum*, to infections with *Hymenolepis diminuta*, *H. microstoma*, and *H. citelli* (Cestoda: Hymenolepididae). J Parasitol. 1971;57(4):881-6.
194. Hurd H, Fogo S. Changes induced by *Hymenolepis diminuta* (Cestoda) in the behaviour of the intermediate host *Tenebrio molitor* (Coleoptera). Can J Zool. 1991;69(9):2291-4.
195. Cawthorn RJ, Anderson RC. Cellular reactions of field crickets (*Achetapennsylvanicus* Burmeister) and German cockroaches (*Blattella germanica* L.) to *Physaloptera maxillaris* Molin (Nematoda: Physalopteroidea). Can J Zool. 1977;55(2):368-75.
196. Anderson RC, Barnes ET, Bartlett CM. Restudy of *Spirura infundibuliformis* McLeod, 1933 (Nematoda: Spiruroidea) from *Spermophilus richardsonii*, with observations on its development in insects. Can J Zool. 1993;71(9):1869-73.
197. Chabaud AG. Developmental cycle of spirurides and nematodes having a comparable biology; systematic evaluation of biological characteristics. Ann Parasitol Hum Comp. 1954;29(1-2):42-88.
198. K Haruki, H Furuya, S Saito, S Kamiya, N Kagei. *Gongylonema* infection in man: a first case of gongylonemosis in Japan. 2005;
199. Ferreira RTB, Melandre AM, Cabral ML, Branquinho MR, Cardarelli-Leite P. Extraction of *Trypanosoma cruzi* DNA from food: a contribution to the elucidation of acute Chagas disease outbreaks. Rev Soc Bras Med Trop. 2016;49(2):190-5.
200. Pereira KS, Schmidt FL, Barbosa RL, Guaraldo AMA, Franco RMB, Dias VL, et al. Transmission of chagas disease (American trypanosomiasis) by food. Adv Food Nutr Res. 2010;59:63-85.
201. Simpanya MF, Allotey J, Mpuchane SF. A mycological investigation of phane, an edible caterpillar of an emperor moth, *Imbrasia belina*. J Food Prot. 2000;63(1):137-40.
202. Mpuchane S, Gashe BA, Allotey J, Siame B, Teferra G, Ditlhogo M. Quality deterioration of phane, the edible caterpillar of an emperor moth *Imbrasia belina*. Food Control. 2000;11(6):453-8.
203. Kasiemobi O, Williams Janet. The Edibility, Methods of Preparation Of the *Raphia* Palm Beetle, *Rhyncophorus Phoenicis* (Coleoptera: Curculionidae) In the Niger Delta and Associated Microorganisms. IOSR J Pharm Biol Sci. 2015;10.

204. Braide(Dr) W, Nwaoguikpe R, Udegbonam I, Akobondu C, Okorondu S, Solomon O. Internet Journal of Food Safety The effect of biodeterioration on the nutritional composition and microbiology of an edible long-winged reproductive termite, *Macrotermes bellicosus*. *Smethman. Internet J Food Saf.* 2011;13:107-14.
205. Braide W, Solomon O, Udegbonam I, Oguoma O, Akobondu C, Nwaoguikpe R. Microbiological quality of an edible caterpillar of an emperor moth, *Bunaea alcinoe*. *J Ecol Nat Env.* 2010;3.
206. Umedum CU, Ofoma C, Ekwudu O, Nwabunnia E. Microbial Quality of Roasted Larvae of the Palm Weevil *Rhyncophorus phoenicis* Sold at Okija and Oba Junctions, Anambra State, Nigeria. *J Med Lab Sci.* 2011;20(1):18-20.
207. Wynants E, Crauwels S, Verreth C, Gianotten N, Lievens B, Claes J, et al. Microbial dynamics during production of lesser mealworms (*Alphitobius diaperinus*) for human consumption at industrial scale. *Food Microbiol.* 2018;70:181-91.
208. Eilenberg J, Vlak J m., Nielsen-LeRoux C, Cappellozza S, Jensen A b. Diseases in insects produced for food and feed. *J Insects Food Feed.* 2015;1(2):87-102.
209. Vandeweyer D, Lievens B, Campenhout LV. Microbiological safety of industrially reared insects for food: Identification of bacterial endospores and targeted detection of foodborne viruses. *bioRxiv.* 2020;2020.04.22.055236.
210. EFSA. Risk profile of insects as food and feed. *Eur Food Saf Auth.* 2015;
211. Mercer CWL. Sustainable production of insects foe food and income by New Guinea villagers. *Ecol Food Nutr.* 1997;36(2-4):151-7.
212. Perez-Riverol A, Lasa AM, Dos Santos-Pinto JRA, Palma MS. Insect venom phospholipases A1 and A2: Roles in the envenoming process and allergy. *Insect Biochem Mol Biol.* 2019;105:10-24.
213. Mosbech H. Anaphylaxis to insect venom. *Novartis Found Symp.* 2004;257.
214. Kachel HS, Buckingham SD, Sattelle DB. Insect toxins – selective pharmacological tools and drug/chemical leads. *Curr Opin Insect Sci.* 2018;30:93-8.
215. Arbiser JL, Kau T, Konar M, Narra K, Ramchandran R, Summers SA, et al. Solenopsin, the alkaloidal component of the fire ant (*Solenopsis invicta*), is a naturally occurring inhibitor of phosphatidylinositol-3-kinase signaling and angiogenesis. *Blood.* 2007;109(2):560-5.
216. Chaboo CS. Defensive Behaviors in Leaf Beetles: From the Unusual to the Weird. In: *Chemical Biology of the Tropics.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2011. p. 59-69. (Signaling and Communication in Plants; vol. 8).
217. Hurley BP, Pirzai W, Eaton AD, Harper M, Roper J, Zimmermann C, et al. An experimental platform using human intestinal epithelial cell lines to differentiate between hazardous and non-hazardous proteins. *Food Chem Toxicol.* 1 juin 2016;92:75-87.

218. Nishimune T, Watanabe Y, Okazaki H, Akai H. Thiamin Is Decomposed Due to *Anaphe* spp. Entomophagy in Seasonal Ataxia Patients in Nigeria. *J Nutr.* 2000;130(6):1625-8.
219. Green ES, Zangerl AR, Berenbaum MR. Effects of phytic acid and xanthotoxin on growth and detoxification in caterpillars. *J Chem Ecol.* 2001;27(9):1763-73.
220. Okezie E, Ugbogu Amadike E, Odungide Aggie A, Atani Chinedu S. Proximate, Antinutritional and Mineral Estimation of Some Selected Consumed Green Vegetables in Afaha Eket, Akwa-Ibom State, Nigeria. *Am J Food Sci Technol.* 2017;5(5):182-91.
221. Omotoso OT. Nutritional quality, functional properties and anti-nutrient compositions of the larva of *Cirina forda* (Westwood) (Lepidoptera: Saturniidae). *J Zhejiang Univ Sci B.* 2006;7(1):51-5.
222. Zagrobelny M, Dreon AL, Gomiero T, Marcazzan GL, Glaring MA, Møller BL, et al. Toxic Moths: Source of a Truly Safe Delicacy. *J Ethnobiol.* 2009;29(1):64-76.
223. Adamolekun B, McCandless DW, Butterworth RF. Epidemic of seasonal ataxia in Nigeria following ingestion of the African Silkworm *Anaphe venata*: Role of thiamine deficiency? *Metab Brain Dis.* 1997;12(4):251-8.
224. Barreteau D. L'homme et l'animal dans le bassin du lac Tchad. Les Mofu-Gudur et leurs criquets. Paris, Institut de Recherche pour le Développement, Université Nanterre. 1999;
225. Rafaeli-Bernstein A, Mordue W. The transport of the cardiac glycoside ouabain by the Malpighian tubules of *Zonocerus variegatus*. *Physiol Entomol.* 1978;3(1):59-63.
226. Faure JC. Pentatomid bugs as human food. *J Entomol Soc South Afr.* 1944;7(1):110-2.
227. Teffo LS, Toms RB, Eloff JN. Preliminary data on the nutritional composition of the edible stink-bug, *Encosternum delegorguei* Spinola, consumed in Limpopo province, South Africa. *South Afr J Sci.* 2007;103(11-12):434-6.
228. Belluco S, Halloran A, Ricci A. New protein sources and food legislation: the case of edible insects and EU law. *Food Secur.* 2017;9(4):803-14.
229. Till JS, Majmudar BN. Cantharidin poisoning. *South Med J.* 1981;74(4):444-7.
230. Bouvier G. Quelques questions d'entomologie vétérinaire et lutte contre certains arthropodes en Afrique tropicale. *Acta Trop.* 1945;2(1):42-59.
231. Bednarska AJ, Opyd M, Żurawicz E, Laskowski R. Regulation of body metal concentrations: Toxicokinetics of cadmium and zinc in crickets. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2015;119:9-14.
232. Devkota B, Schmidt GH. Accumulation of heavy metals in food plants and grasshoppers from the Taigetos Mountains, Greece. *Agric Ecosyst Environ.* 1 mars 2000;78(1):85-91.

233. Zhang Z-S, Lu X-G, Wang Q-C, Zheng D-M. Mercury, Cadmium and Lead Biogeochemistry in the Soil–Plant–Insect System in Huludao City. *Bull Environ Contam Toxicol*. 2009;83(2):255-9.
234. Poma G, Cuykx M, Amato E, Calaprice C, Focant JF, Covaci A. Evaluation of hazardous chemicals in edible insects and insect-based food intended for human consumption. *Food Chem Toxicol*. 2017;100:70-9.
235. Janssen MPM, Ma WC, Van Straalen NM. Biomagnification of metals in terrestrial ecosystems. *Sci Total Environ*. 1993;134:511-24.
236. SLU, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Biomedical Sciences and Veterinary Public Health, Sweden, Fernandez-Cassi X, Supeanu A, Jansson A, Boqvist S, et al. Novel foods: a risk profile for the house cricket (*Acheta domesticus*). *EFSA J Eur Food Saf Auth*. 2018;16(Suppl 1):e16082.
237. Vijver M, Jager T, Posthuma L, Peijnenburg W. Metal uptake from soils and soil-sediment mixtures by larvae of *Tenebrio molitor* (L.) (Coleoptera). *Ecotoxicol Environ Saf*. 2003;54(3):277-89.
238. Lindqvist L, Block M. Excretion of cadmium during moulting and metamorphosis in *Tenebrio molitor* (Coleoptera; Tenebrionidae). *Comp Biochem Physiol C Pharmacol Toxicol Endocrinol*. 1995;111(2):325-8.
239. Dallinger R, Rainbow PS. *Ecotoxicology of Metals in Invertebrates*. CRC Press; 1993. 486 p.
240. Postma JF, VanNugteren P, Jong MBB-D. Increased cadmium excretion in metal-adapted populations of the midge *Chironomus riparius* (diptera). *Environ Toxicol Chem*. 1996;15(3):332-9.
241. Green K, Broome L, Heinze D, Johnston S. Long distance transport of arsenic by migrating bogong moths from agricultural lowlands to mountain ecosystems. *Vic Nat*. 2001;
242. Zhuang P, Zou H, Shu W. Biotransfer of heavy metals along a soil-plant-insect-chicken food chain: field study. *J Environ Sci China*. 2009;21(6):849-53.
243. Ortiz C, Weiss-Penzias PS, Fork S, Flegal AR. Total and monomethyl mercury in terrestrial arthropods from the central California coast. *Bull Environ Contam Toxicol*. 2015;94(4):425-30.
244. DeFoliart GR. Insects as food: why the western attitude is important. *Annu Rev Entomol*. 1999;1(44):21-50.
245. Muaz K, Riaz M, Akhtar S, Park S, Ismail A. Antibiotic Residues in Chicken Meat: Global Prevalence, Threats, and Decontamination Strategies: A Review. *J Food Prot*. 2018;81(4):619-27.

246. Van der Brempt X, Moneret-Vautrin DA. Le risque allergique de *Tenebrio molitor* pour la consommation humaine. *Rev Fr Allergol*. 2014;54(1):34-6.
247. FAO - OMS. Codex Alimentarius: Joint FAO/WHO Food Standards Programme [Internet]. 2001. Disponible sur: www.codexalimentarius.org/
248. FAO, IAEA. Manual on the application of the HACCP system in Mycotoxin prevention and control. 2001.
249. Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes. Hygiène alimentaire - Le plan de maîtrise sanitaire : les prérequis et l'HACCP [Internet]. 2020 [cité 12 sept 2020]. Disponible sur: <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/hygiene-alimentaire-plan-maitrise-sanitaire-prerequis-et-lhaccp>
250. Finke MD. Complete nutrient composition of commercially raised invertebrates used as food for insectivores. *Zoo Biol*. 2002;21(3):269-85.
251. Fraenkel G. The Nutrition of the Mealworm, *Tenebrio molitor* L. (Tenebrionidae, Coleoptera). *Physiol Zool*. avr 1950;23(2):92-108.
252. Leclercq J. Importance de la lysine et du tryptophane dans la nutrition de *Tenebrio molitor* L. *Experientia*. 1948;4(11):436-7.
253. Urs KCD, Hopkins TL. Effect of moisture on growth rate and development of two strains of *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera, Tenebrionidae). *J Stored Prod Res*. 1973;8(4):291-7.
254. Bernstein DI, Gallagher JS, Leonard Bernstein I. Mealworm asthma: clinical and immunologic studies. *J Allergy Clin Immunol*. 1983;72(5, Part 1):475-80.
255. Siracusa A, Marcucci F, Spinozzi F, Marabini A, Pettinari L, Pace ML, et al. Prevalence of occupational allergy due to live fish bait. *Clin Exp Allergy*. 2003;33(4):507-10.
256. Ledent C, Mairesse M. Une dyspnée d'origine halieutique. *Rev Fr Allergol Immunol Clin*. 1 janv 2006;46(1):36-7.
257. Organisation mondiale de la santé. Rapport trimestriel de statistiques sanitaires mondiales. Organisation mondiale de la santé; 2014.
258. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. Les missions des services de l'État dans les abattoirs [Internet]. 2016 [cité 12 sept 2020]. Disponible sur: <https://agriculture.gouv.fr/les-missions-des-services-de-letat-dans-les-abattoirs>
259. Amadi EN, Kasiemobi OO. Microbiology and nutritional composition of an edible larva (*Bunaea alcinoe* Stoll) of the Niger Delta. *J Food Saf*. 2005;
260. Borremans A, Lenaerts S, Crauwels S, Lievens B, Van Campenhout L. Marination and fermentation of yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*). *Food Control*. 2018;92:47-52.

261. Kenya Bureau of Standards. Products containing edible insects—Specification. 2020.
262. Vandeweyer D, Lenaerts S, Callens A, Van Campenhout L. Effect of blanching followed by refrigerated storage or industrial microwave drying on the microbial load of yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*). *Food Control*. 2017;71:311-4.
263. Khedari B. The influence of the thermic treatment on the microbiological quality of the meat paste (poultry). 1988;
264. Verhoeckx K, van Broekhoven S, Gaspari M, de Hartog-Jager S, de Jong G, Wichers H, et al. House dust mite (Derp 10) and crustacean allergic patients may be at risk when consuming food containing mealworm proteins. *Clin Transl Allergy*. 25 juill 2013;3(3):P48.
265. Beaumont P, Courtois J, Van der Brempt X, Tollenaere S. Food-induced anaphylaxis to *Tenebrio molitor* and allergens implicated. *Rev Fr Allergol*. 2019;59(5):389-93.
266. Vanasselt E, Zwietering M. A systematic approach to determine global thermal inactivation parameters for various food pathogens. *Int J Food Microbiol*. 1 mars 2006;107(1):73-82.
267. Oyeyemi OT, Agbaje MO, Okelue UB. Food-borne human parasitic pathogens associated with household cockroaches and houseflies in Nigeria. *Parasite Epidemiol Control*. 2016;1(1):10-3.
268. INERIS. Synthèse des valeurs réglementaires pour les substances chimiques, en vigueur dans l'eau, les denrées alimentaires et dans l'air. 2017.

Annexes

Annexe I : Études scientifiques disponibles sur la composition microbienne des insectes comestibles frais ou transformés (2000-2019) (152).

Insect species	Form	Eumycetes	Bacteria	References
<i>Imbrasia belina</i> Mopane worm	hole, boiled, dried laboratory-stored mopane and intestinal mopane contents	<i>Alternaria alternata</i> , <i>Aspergillus</i> <i>spp.</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus</i> <i>flavus/parasiticus</i> , <i>Aspergillus</i> <i>ochraceus</i> , <i>Aureobasidium pullulans</i> , <i>Chrysosporium pannorum</i> , <i>Cladosporium sphaerospermum</i> , <i>Chaetomium globosum</i> , <i>Drechslerapoe</i> , <i>Emericella nidulans</i> , <i>Epicoccum</i> <i>purpurascens</i> , <i>Eurotium chevalieri</i> , <i>Fusarium spp.</i> , <i>Gliocladium roseum</i> , <i>Leptosphaeria spp.</i> , <i>Monascus ruber</i> , <i>Mucor spp.</i> , <i>Mycelia sterilia</i> , <i>Neocosmopora spp.</i> , <i>Phoma glomerata</i> , <i>Penicillium spp.</i> , <i>Penicillium</i> <i>aurantiogriseum</i> , <i>Penicillium</i> <i>verrucosum</i> , <i>Penicillium citrinum</i> , <i>Penicillium brevicompactum</i> , <i>Penicillium</i> <i>chrysogenum</i> , <i>Penicillium hirsutum</i> , <i>Penicillium sclerotium</i> , <i>penicillium</i> <i>spinulosum</i> , <i>Perithecial fungi</i> , <i>Pycnidial</i> <i>fungi</i> , <i>Rhizopus oryzae</i> , <i>Syncephalastrum racemosum</i> , <i>Neosartorya spp.</i> , <i>Trichoderma viride</i> , <i>Ulocladium chartarum</i> , <i>Yeasts</i> .		Simpanya et al. (2000)
<i>Imbrasia belina</i> Mopane worm	Fresh	<i>Aspergillus spp.</i> , <i>Phycomycetes</i> , <i>Penicillium spp.</i> , <i>Dematiaceous fungi</i> , <i>Chaetomium spp.</i> , <i>Fusarium spp.</i>	<i>Arthobacter spp</i> , <i>Bacillus spp</i> , <i>Favobacterium spp</i> , <i>Pseudomonas</i> <i>spp</i> , <i>Xanthomonas spp</i>	Mpuchane et al. (2000)
<i>Bunaea alcinoe</i> larvea	Fresh		<i>Staphylococcus spp.</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Bacillus</i> <i>spp.</i> , <i>Micrococcus spp.</i> , <i>Acinetobacter spp.</i>	Amadi et al. (2005)
<i>Bunaea alcinoe</i> larve	Processed (degutted, washed, spiced, salted, roasted and sun- dried)	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Penicillium</i> <i>caseiocolum</i> , <i>Fusarium moniliforme</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Bacillus</i> <i>cereus</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Proteus mirabilis</i> , <i>Streptococcus mitis</i>	Braide, Oranusi, et al. (2011)

Larva of <i>Cirina forda</i> (pallid emperor moth)	Dried, sun-dried and powdered	<i>Mucor spp., Aspergillus niger, Rhizopus spp.</i>	<i>Staphylococcus aureus, Escherichia coli, Salmonella spp., Proteus spp., Micrococcus spp.</i>	Igbabul et al. (2014)
<i>Comadia redtenbacheri</i> (agave red worm)	Fresh		<i>Paenibacillus spp., Bacillus safensis, Pseudomonas spp., Bacillus pseudomycooides, Corynebacterium variabile, Enterococcus spp., Gordonia spp., Acinetobacter calcoaceticus, Arthrobacter spp., Micrococcus spp., Bacillus cereus</i>	Hernández-Flores et al. (2015)
<i>Bombyx mori</i> (silkworm pupae) <i>Omphisa fuscidentalis</i> (bamboo borer caterpillar)	Processed (deepfried, dried, tsukudani, others)			Grabowski and Klein (2017b)
Thailand <i>Bombyx mori</i> (silkworm pupae)	Whole, boiled, dried and salted		<i>Geobacillus spp., Corynebacterium spp., Bacillus cereus, Bacillus lehensis, Paenibacillus apiaries, Bacillus spp., Anaerobacillus spp</i>	Milanović et al. (2016), Osimani, Milanović, Garofalo, Cardinali, et al. (2018)
<i>Bombyx mori</i> (silkworm pupae)	Whole and processed (freeze-dried, roasted, cooked and dehydrated)		<i>Bacillus cereus, Bacillus thuringensis, Bacillus cytotoxicus, Lysinobacillus spp., Brevibacillus spp.</i>	Fasolato et al. (2018)
<i>Rhynchophorus phoenicis</i> (palm weevil beetle) larva	Fresh and fried		Fresh: <i>Bacillus spp., Enterobacter spp., Serratia spp., Staphylococcus spp.</i> Fried: <i>Bacillus spp., Staphylococcus spp.</i>	Wachukwu et al. (2002)
<i>Oryctes monoceros</i> larvae	Fresh and processed (dried, fried and condimented) during 9 days storage at room temperature and at 4°C	<i>Fusarium compacticum, Cladosporium spp., Fusarium oxysporum, Aspergillus niger, Penicillium oxalicum, Penicillium chrysogenum</i>	<i>Bacillus firmus, Bacillus subtilis, Bacillus cereus, Bacillus licheniformis, Serratia marcescens, Micrococcus spp., Staphylococcus aureus, Klebsiella aerogenes, Proteus vulgaris, Escherichia coli, Aerobacter aerogenes, Pseudomonas aeruginosa</i>	Banjo et al. (2006)
<i>Rhynchophorus phoenicis</i>	Roasted	<i>Aspergillus niger, Rhizopus spp., Mucor spp.</i>	<i>Staphylococcus aureus, Bacillus cereus, Escherichia coli,</i>	Ekrakene and Igeleke (2007)

(palm weevil beetle) larvae			<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	
<i>Rhychophorus phoenicis</i> (palm weevil beetle) larvae	Roasted	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Rhizopus spp.</i> , <i>Mucor spp.</i>	<i>Escherichia coli</i> , <i>Bacillus spp.</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Umedum et al. (2011)
<i>Rhynchophorus phoenicis</i> larvae	Fresh and heat processed		<i>Staphylococcus spp.</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Klebsiella aerogenes</i>	Opara et al. (2012)
<i>Rhynchophorus phoenicis</i> (palm -wine beetle) adult	Fresh	Skin: <i>Saccharomyces spp.</i>	Skin: <i>Acinetobacter spp.</i> , <i>Bacillus spp.</i> , <i>Klebsiella spp.</i> , <i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Serratia spp.</i> , <i>Staphylococcus spp.</i> Gut: <i>Bacillus spp.</i> , <i>Enterobacter spp.</i> , <i>Serratia spp.</i> , <i>Staphylococcus spp.</i>	Amadi et al. (2014)
<i>Rhynchophorus phoenicis</i> (palm weevil) larvae	Fresh and roasted		Fresh: <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella spp.</i> , Roasted: <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Proteus vulgaris</i>	Ebenebe and Okpoko (2015)
<i>Rhynchophorus phoenicis</i> (Raphia palm beetle) adult, larvae, pupa, pith	Fresh	<i>Penicillium spp.</i> , <i>Aspergillus spp.</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	<i>Bacillus spp.</i> , <i>Staphylococcus spp.</i> , <i>Acinetobacter spp.</i> , <i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Micrococcus spp.</i> , <i>Proteus spp.</i>	Ogbalu and Williams (2015)
<i>Heteroligus meles</i> (yam beetle) adult	Fresh (whole and wingless)	<i>Aspergillus spp.</i> ,	<i>Cryptococcus spp.</i> <i>Arthrobacter spp.</i> , <i>Bacillus spp.</i> , <i>Staphylococcus spp.</i>	Amadi et al. (2016)
<i>Tenebrio molitor</i> larvae	Market Whole, boiled, dried and salted		<i>Bacillus simplex</i> , <i>Stenotrophomonas spp.</i> , <i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Lactobacillus spp.</i> , <i>Staphylococcus spp.</i> , <i>Streptococcus spp.</i> , <i>Vagococcus spp.</i>	Milanović et al. (2016)
<i>Tenebrio molitor</i> larvae	Fresh		<i>Propionobacterium spp.</i> , <i>Haemophilus spp.</i> , <i>Staphylococcus spp.</i> , <i>Clostridium spp.</i> , <i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Lactobacillus spp.</i> , <i>Streptococcus spp.</i>	Milanović et al. (2016); Osimani, Milanović, Garofalo, Cardinali, et al. (2018)

<i>Tenebrio molitor</i> larvae	Whole, boiled and dried		<i>Enterococcus</i> spp., <i>Fusobacterium</i> spp., <i>Enterobacteriaceae</i> , <i>Enterobacter</i> spp., <i>Spiroplasma</i> spp., <i>Staphylococcus</i> spp., <i>Bacillus</i> spp., <i>Clostridium</i> spp., <i>Listeria</i> spp.	Stoops et al. (2016)
<i>Tenebrio molitor</i> larvae	Whole, boiled and dried	<i>Candida zeylanoides</i> , <i>Pichia</i> spp., <i>Debaryomyces hansenii</i>	<i>Klebsiella</i> spp. <i>Erwinia</i> spp., <i>Enterobacter</i> spp., <i>Salmonella</i> spp., <i>Pantoea agglomerans</i> , <i>Agrococcus</i> spp., <i>Clostridium thermopalmarium</i> , <i>Rufibacter</i> spp.	Garofalo et al. (2017)
<i>Tenebrio molitor</i> larvae		<i>Debaryomyces hansenii</i>	<i>Enterobacter</i> spp., <i>Enterobacter ludwigii</i> , <i>Enterobacter cloacae</i> , <i>Enterobacter hormaechei</i> , <i>Klebsiella oxytoca</i> , <i>Klebsiella michiganensis</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Vibrio</i> spp., <i>Trabulsilla</i> spp., <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Yersinia</i> spp., <i>Morganella</i> spp., <i>Escherichia coli</i> , <i>Pantoea agglomerans</i> , <i>Loktanella maricola</i>	Osimani, Garofalo, Milanović, et al. (2017)
<i>Tenebrio molitor</i> larvae	Whole, boiled, dried and salted		<i>Staphylococcus warneri</i> , <i>pasteuri/kloosi/cohnii</i> /spp.	Osimani, Cardinali, Aquilanti, et al. (2017); Milanović et al. (2018)
<i>Tenebrio molitor</i> larvae			<i>Spiroplasma</i> spp., <i>Erwinia oleae</i> , <i>Clostridia</i> spp., <i>Enterobacteriaceae</i> , <i>Cronobacter</i> spp., <i>Enterococcus</i> spp., <i>Citrobacter koseri</i> , <i>Brevibacillus</i> spp., <i>Lactococcus</i> spp., <i>Pseudomonas deceptionensis</i> , <i>Pseudomonas antarctica</i> , <i>Buttiauxella agrestis</i> , <i>Photobacterium</i> spp.	Milanović et al. (2018)
<i>Alphitobius diaperinus</i> larvae	Processed (dried, powder, others)	<i>Penicillium</i> spp		Milanović et al. (2018)
<i>Tenebrio molitor</i> larvae		<i>Penicillium</i> spp., <i>Mucor</i> spp.	<i>Listeria ivanovii</i>	Vandeweyer, Crauwels, et al. (2017a, 2017b)
<i>Alphitobius diaperinus</i> larvae	Fresh	<i>Aspergillus flavus</i> , <i>Trichosporon asahii</i> , <i>Pichia sporocuriosa</i>	<i>Buttiauxella agrestis</i> , <i>Staphylococcus arlettae</i> , <i>Aeromonas</i> spp., <i>Enterococcus</i> spp., <i>Lactococcus formosensis</i> ,	Grabowski and Klein (2017b)

			<i>Lactobacillus antri</i> , <i>Acinetobacter baumannii</i>	
<i>Tenebrio molitor</i> larvae	Fresh		<i>Enterobacter spp.</i> , <i>Erwinia spp.</i> , <i>Klebsiella spp.</i> , <i>Pantoea spp.</i> , <i>Xenorhabdus spp.</i> , <i>Enterococcus spp.</i> , <i>Lactococcus spp.</i> , <i>Spiroplasma spp.</i>	Wynants et al. (2018)
<i>Tenebrio molitor</i> larvae	Whole and processed (freeze-dried, roasted, cooked and dehydrated)		<i>Kokuria rizophila</i> , <i>Macrocococcus spp.</i> , <i>Bacillus cereus sensu stricto group</i> , <i>Bacillus thuringensis</i> , <i>Bacillus cytotoxicus</i> , <i>Lysinobacillus spp.</i> , <i>Brevibacillus spp.</i>	Vandeweyer et al. (2019)
<i>Gryllotalpa africana</i>	Fresh	<i>Aspergillus spp.</i> , <i>Alternaria spp.</i> , <i>Fusarium spp.</i> , <i>Penicillium spp.</i> , <i>Rhizopus spp.</i>	<i>Proteus spp.</i> , <i>Bacillus spp.</i> , <i>Staphylococcus spp.</i> , <i>Micrococcus spp.</i> , <i>Corynebacterium spp.</i> , <i>Pseudomonas spp.</i>	Ogbalu and Renner (2015)
<i>Acheta domesticus</i> adults	Boiled, dried and salted, powdered and whole			Milanović et al. (2016)
<i>Locusta migratoria</i> adults	Whole, boiled, dried and salted			Milanović et al. (2016)
<i>Gryllotalpidae</i> (mole crickets)	Whole, boiled, dried and salted		<i>Bacillus cytotoxicus</i> , <i>Bacillus spp.</i> , <i>Anaerobacillus spp.</i>	Milanović et al. (2016); Osimani, Milanović, Garofalo, Cardinali, et al. (2018)
<i>Locusta migratoria migratorioides</i> adults	Fresh		<i>Weissella spp.</i> , <i>Lactococcus spp.</i> , <i>Yersinia/Rahnella spp.</i> , <i>Enterococcus spp.</i> , <i>Klebsiella/Enterobacter spp.</i> , <i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Haemophilus spp.</i>	Stoops et al. (2016)
<i>Acheta domesticus</i> (house cricket)	Processed (deepfried, dried, extruded, tsukudani)		<i>Proteus spp.</i> , <i>Bacillus cereus</i>	Grabowski and Klein (2017b)
<i>Locusta migratoria</i> (migratory locust)		<i>Mucor spp.</i>	<i>Proteus spp.</i>	Grabowski and Klein (2017b)

<i>Acheta domesticus</i> adults	Whole, boiled and dried		<i>Bacteroides</i> spp., <i>Dysgonomonas</i> spp., <i>Rikenellaceae</i> , <i>Clostridium</i> spp., <i>Bacillus</i> spp., <i>Lachnospiraceae</i> , <i>Ruminococcaceae</i> , <i>Enterobacteriaceae</i> , <i>Pseudomonadaceae</i> , <i>Staphylococcus</i> spp.	Garofalo et al. (2017)
<i>Acheta domesticus</i> adults	Boiled, dried and powdered		<i>Corynebacterium variabile</i> , <i>Bacteroides</i> spp., <i>Parabacteroides</i> spp., <i>Enterococcus</i> spp., <i>Enterococcus haemoperoxidus</i> , <i>Lactococcus garvieae</i> , <i>Clostridium</i> spp., <i>Bacillus</i> spp., <i>Staphylococcus</i> spp., <i>Listeria</i> spp., <i>Lachnospiraceae</i> , <i>Ruminococcaceae</i> , <i>Enterobacteriaceae</i> , <i>Pseudomonadaceae</i>	Garofalo et al. (2017)
<i>Locusta migratoria</i> adults	Whole, boiled and dried		<i>Enterococcus</i> spp., <i>Pediococcus acidilactici</i> , <i>Weissella</i> spp., <i>Enterobacteriaceae</i> , <i>Staphylococcus</i> spp.	Garofalo et al. (2017)
<i>Acheta domesticus</i> adults	Whole, boiled and dried	<i>Wallemia muriae</i> , <i>Tetrapisispora namnaoensis</i> , <i>Tetrapisispora fleetii</i>	<i>Erwinia</i> spp., <i>Citrobacter</i> spp., <i>Bacillus weihenstephanensis</i> , <i>Streptomyces glaucusporus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Acinetobacter</i> spp., <i>Naxibacter intermedius</i> , <i>Planomicrobium chinense</i> <i>Acinetobacter</i> spp., <i>Arthrobacter tecti</i>	Osimani, Garofalo, Milanović, et al. (2017)
<i>Acheta domesticus</i> adults	Boiled, dried and powdered	<i>Eurotium repens</i> , <i>Tetrapisispora namnaoensis</i> , <i>Tetrapisispora fleetii</i> <i>Aspergillus chevalieri</i> , <i>Aspergillus cristatus</i> , <i>Aspergillus amstelodami</i> , <i>Aspergillus intermedius</i> , <i>Eurotium chevalieri</i> , <i>Eurotium intermedium</i>	<i>Bacillus cereus</i> , <i>Clostridium thermopalmarium</i> , <i>Naxibacter intermedius</i> , <i>Rufibacter</i> spp., <i>Pediococcus lolii</i>	Osimani, Garofalo, Milanović, et al. (2017)
<i>Locusta migratoria</i> adults	Whole, boiled and dried	<i>Wallemia muriae</i> , <i>Aspergillus cristatus</i> , <i>Aspergillus amstelodami</i>	<i>Weissella confusa</i> , <i>Weissella cibaria</i> , <i>Clostridium thermopalmarium</i>	Osimani, Garofalo, Milanović, et al. (2017)
<i>Locusta migratoria</i> adults	Whole, boiled and dried		<i>Enterococcus</i> spp., <i>Leuconostoc mesenteroides</i> , <i>Weissella confusa</i>	Osimani, Garofalo, Milanović, et al. (2017)

<i>Locusta migratoria migratorioides</i> adults	Whole, boiled, dried and salted		<i>Weissella cibaria/ confusa/spp.</i>	Osimani, Garofalo, Aquilanti, et al. (2017); Milanović et al. (2018)
<i>Locusta migratoria migratorioides</i> adults			<i>Staphylococcus haemolyticus/ argenteus/homis/ aureus/spp.</i>	Osimani, Garofalo, Aquilanti, et al. (2017); Milanović et al. (2018)
<i>Locusta migratoria migratorioides</i> adults			<i>Bacillus sonorensis/ subtilis/ amyloliquefaciens/ axarquiensis/spp.</i>	Osimani, Garofalo, Aquilanti, et al. (2017); Milanović et al. (2018)
Cricket: <i>Acheta domesticus</i> adults and <i>Gryllodes sigillatus</i> adults	Fresh		<i>Bacteroides spp., Parabacteroides spp., Photorhabdus spp., Buttiauxella agrestis, Enterobacteriaceae, Enterococcus spp., Erwinia oleae, Pseudomonadaceae, Lactococcus spp., Clostridiales spp.</i>	Vandeweyer, Crauwels, et al. (2017a, 2017b)
Cricket: <i>Acheta domesticus</i> and <i>Gryllus campestris</i>	Whole and processed (freezedried, roasted, cooked and dehydrated)		<i>Kokuria rizophila, Macrocooccus spp., Enterococcus faecium, Pediococcus acidilactici, Bacillus cereus sensu stricto group, Bacillus thuringensis, Bacillus cytotoxicus, Lysinobacillus spp., Brevibacillus spp.</i>	Fasolato et al. (2018)
<i>Gryllotalpidae</i> (mole cricket)			<i>Bacillus cereus sensu stricto group, Bacillus thuringensis, Bacillus cytotoxicus, Lysinobacillus spp., Brevibacillus spp.</i>	Fasolato et al. (2018)
<i>Ruspolia differens</i> (grasshopper)	Fresh		<i>Acinetobacter spp., Buttiauxella spp., Staphylococcus spp., Undibacterium spp., Bacillus spp., Campylobacter rectus, Campylobacter concisus, Clostridium spp., Pseudomonas</i>	Ssepuyua et al. (2019)

			<i>spp., Neisseria spp., Weissella spp., Lactococcus spp., Enterococcus spp., Lactobacillus spp., Leuconostoc spp., Kurthia spp., Enhydrobacter spp., Erwinia spp., Corynebacterium spp., Streptococcus spp., Vagococcus fluvialis</i>	
Crickets: <i>Acheta domesticus</i> adults and <i>Grylloides sigillatus</i> adults	Fresh			Vandeweyer et al. (2019)

Annexe II : Principaux germes bactériens, virus, micromycètes et parasites impliqués dans les toxiinfections et les intoxications alimentaires (257,266,267).

Germes bactériens	Micromycètes	Parasites	Virus
<i>Aspergillus flavus</i>	<i>Aspergillus clavatus</i>	<i>Ascaris lumbricoides</i>	Novovirus
<i>Bacillus cereus</i>	<i>Aspergillus flavus</i>	<i>Entamoeba histolytica</i>	Virus de l'hépatite A
<i>Vibrio parahaemolyticus</i>	<i>Aspergillus ocraceus</i>	<i>Enterobius vermicularis</i>	
<i>Vibrio cholerae</i>	<i>Cryptococcus neoformans</i>	<i>Taenia spp.</i>	
<i>Escherichia coli</i>	<i>Mucor spp.</i>	<i>Toxoplasma gondii</i>	
<i>Campylobacter jejuni</i>	<i>Penicillium citrinum</i>	<i>Trichinella spiralis</i>	
<i>Yersinia enterocolitica</i>	<i>Penicillium expansum</i>	<i>Trichuris trichiura</i>	
<i>Listeria monocytogenes</i>	<i>Penicillium viridicatum</i>		
<i>Listeria ivanovii</i>			
<i>Aeromonas hydrophila</i>			
<i>Salmonella spp.</i>			
<i>Shigella spp.</i>			
<i>Staphylococcus aureus</i>			
<i>Clostridium perfringens</i>			
<i>Clostridium botulinum</i>			

Annexe III : Synthèses des valeurs maximums réglementaires européennes pour différentes substances concernant la viande, le poisson et les crustacés (268). Les valeurs peuvent être comprises entre différents niveaux en fonction de la partie de l'animal.

Substances	Viande	Poisson	Crustacés	Règlements européennes
Plomb (mg/kg de poids à l'état frais)	0,10	0,30	0,50	Règlement 1881/2006 modifié par les règlements européens 420/2011, 488/2014 et 1005/2015
Cadmium (mg/kg de poids à l'état frais)	0,05 - 0,20	0,10 - 0,25	0,50	
Mercurure (mg/kg de poids à l'état frais)	-	0,50 - 1,0	0,50	
Dioxines et Polychlorobiphényle (pg/g de poids à l'état frais)	0,3 - 2,5	3,5	3,5	Règlement 1881/2006 modifié par le règlement CE1067/2013
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (µg/kg de poids à l'état frais)	12 - 30	12 - 30	12	Règlement 1881/2006 modifié par les règlements 835/2011, 1933/2015 et le règlement 1125/2015

Annexe IV : Teneur calorique, en protéine, en lipide, en fibre, en minéraux et en vitamines de 100g de *Tenebrio molitor* (adulte, larve et chrysalide) (103)

	Stade	Quantité moyenne
Energie (kcal)	Adulte	178
	Larve	214
	Chrysalide	207
Protéine (g)	Adulte	24,13
	Larve	17,85
	Chrysalide	12,01
Lipides totaux (g)	Adulte	6,14
	Larve	12,91
	Chrysalide	12,91
Fibre détergente acide (g)	Adulte	6,8
	Larve	2,38
	Chrysalide	2
Fibre détergente acide (g)	Adulte	12
	Larve	5,2
Calcium (mg)	Chrysalide	24
	Adulte	150
	Larve	43
Chloride (mg)	Adulte	191
	Larve	181
Fer (mg)	Chrysalide	2,87
	Adulte	1,89
	Larve	1,68
Iode (mg)	Adulte	22
	Larve	17
Potassium (mg)	Chrysalide	368
	Adulte	337
	Larve	355
Magnésium (mg)	Chrysalide	69
	Adulte	92
	Larve	86

Manganèse (mg)	Chrysalide	0,456
	Adulte	0,287
	Larve	0,546
Molybdène (mg)	Adulte	39
Sodium (mg)	Chrysalide	66
	Adulte	50
	Larve	55
Phosphore (mg)	Chrysalide	295
	Adulte	368
	Larve	300
Sélénium (mg)	Chrysalide	13,6
	Adulte	16,3
	Larve	12,09
Zinc (mg)	Chrysalide	4,86
	Adulte	4,33
	Larve	3,9
Vitamine A (UI)	Larve	29
Vitamine E (mg)	Larve	1,9
Vitamine B6 (mg)	Larve	0,7
Vitamine B1 (mg)	Larve	0,18
Vitamine B2 (mg)	Larve	1,21
Vitamine B3 (mg)	Larve	4,10
Vitamine B5 (mg)	Larve	2,04
Vitamine B9 (µg)	Larve	137
Vitamine B8 (µg)	Larve	33,5
Vitamine B12 (µg)	Larve	0,3
Vitamine C (µg)	Larve	1,8

Serment de Galien

Je jure, en présence des maîtres de la faculté, des conseillers de l'ordre des pharmaciens et
de mes condisciples :

D'honorer ceux qui m'ont instruit dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma
reconnaissance en restant fidèle à leur enseignement ;

D'exercer, dans l'intérêt de la santé publique, ma profession avec conscience et de respecter
non seulement la législation en vigueur, mais aussi les règles de l'honneur, de la probité et
du désintéressement ;

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité
humaine.

En aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les
mœurs et favoriser des actes criminels.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses. Que je sois
couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque.

Nourrir le monde de demain : avantages et risques de l'entomophagie

Thèse d'exercice pour le diplôme d'état de docteur en pharmacie

Résumé

Il est largement admis qu'en 2050, le monde accueillera 9 milliards d'habitants. Nourrir les populations futures nécessitera le développement de sources alternatives de protéines, tels que les insectes. Il est nécessaire de vérifier l'innocuité de cette source alimentaire. Du point de vue de la santé, il est possible de trouver dans différents insectes l'ensemble des nutriments essentiels à l'humain. Cependant les insectes peuvent être à l'origine d'allergie et plus particulièrement de réactivités croisées. Les insectes peuvent contenir des microorganismes tel que des pathogènes alimentaires (bactéries, moisissures, levures et parasites). Certaines espèces contiennent des substances toxiques et peuvent bioaccumuler des métaux lourds et des pesticides. Compte tenu des immenses quantités de biomasse d'insectes nécessaires pour remplacer les ingrédients riches en protéines, des installations d'élevage de masse devront être développées. Le défi pour cette nouvelle industrie sera d'assurer une production rentable et fiable d'une biomasse d'insectes de qualité élevée et constante. Des cadres réglementaires doivent être développés. L'étroite collaboration entre les pouvoirs publics, l'industrie et le monde universitaire sera au développement significatif de l'entomophagie.

Mots-clés

- Entomophagie
- Insectes comestibles
- Risques alimentaires
- Alimentation et nutrition
- Allergies aux arthropodes
- Ecologie et environnement
- Contaminations microbiologiques