



OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/> 25505

**To cite this version:**

Langlade, Fanny . *Utilisation des insectes en alimentation humaine : situation actuelle, enjeux et perspectives*. Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse – ENVT, 2019, 159 p.

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# UTILISATION DES INSECTES EN ALIMENTATION HUMAINE : SITUATION ACTUELLE, ENJEUX ET PERSPECTIVES

---

THESE  
pour obtenir le grade de  
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement  
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

*par*

**LANGLADE Fanny**

Née, le 19/04/1993 à BRIVE-LA-GAILLARDE (19)

---

**Directeur de thèse : M. Pierre SANS**

---

## JURY

PRESIDENT :

**M. Gérard CAMPISTRON**

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :

**M. Pierre SANS**

**M. Hubert BRUGERE**

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE



**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation  
ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE DE TOULOUSE**

**Directrice** : **Madame Isabelle CHMITELIN**

**PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE**

- Mme **CHASTANT-MAILLARD Sylvie**, *Pathologie de la Reproduction*
- M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Physiologie et Thérapeutique*
- Mme **CLAUW Martine**, *Pharmacie-Toxicologie*
- M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie Pathologique*
- M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
- M. **PETIT Claude**, *Pharmacie et Toxicologie*
- M. **SHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*

**PROFESSEURS 1° CLASSE**

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des aliments*
- M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
- M. **BERTHELOT Xavier**, *Pathologie de la Reproduction*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des aliments d'Origine animale*
- Mme **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie Vétérinaire*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootecnie*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Aviculture et pathologie aviaire*
- Mme **HAGEN-PICARD, Nicole**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
- M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **SANS Pierre**, *Productions animales*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Biologie Médicale Animale et Comparée*

**PROFESSEURS 2° CLASSE**

- Mme **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
- Mme **LACROUX Caroline**, *Anatomie Pathologique, animaux d'élevage*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des Ruminants*
- M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*

**PROFESSEURS CERTIFIÉS DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE**

- Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*
- M. **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

**MAÎTRES DE CONFÉRENCES HORS CLASSE**

- M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*
- Mme **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*

- Mme **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
- M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
- M. **JOUGLAR Jean-Yves**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*
- M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
- M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation*
- Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*
- M. **RABOISSON Didier**, *Productions animales (ruminants)*
- M. **VERWAERDE Patrick**, *Anesthésie, Réanimation*
- M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et Infectiologie*

#### MAITRES DE CONFERENCES (classe normale)

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **BENNIS-BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
- Mme **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
- Mme **BOUHSIRA Emilie**, *Parasitologie, maladies parasitaires*
- M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*
- M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
- M. **CUEVAS RAMOS Gabriel**, *Chirurgie Equine*
- Mme **DANIELS Hélène**, *Microbiologie-Pathologie infectieuse*
- Mme **DAVID Laure**, *Hygiène et Industrie des aliments*
- Mme **DEVIERS Alexandra**, *Anatomie-Imagerie*
- M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie vétérinaire et comparée*
- Mme **FERRAN Aude**, *Physiologie*
- Mme **LALLEMAND Elodie**, *Chirurgie des Equidés*
- Mme **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*
- M. **LE LOC'H Guillaume**, *Médecine zoologique et santé de la faune sauvage*
- M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie Chirurgicale*
- Mme **MILA Hanna**, *Elevage des carnivores domestiques*
- M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction (en disponibilité)*
- Mme **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
- Mme **PAUL Mathilde**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles et porcins*
- M. **VERGNE Timothée**, *Santé publique vétérinaire – Maladies animales règlementées*
- Mme **WASET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*

#### MAITRES DE CONFERENCES CONTRACTUELS

- Mme **BORDE DORE Laura**, *Médecine interne des équidés*
- M. **LEYNAUD Vincent**, *Médecine interne*

#### ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

- Mme **BLONDEL Margaux**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
- M. **CARTIAUX Benjamin**, *Anatomie-Imagerie médicale*
- M. **COMBARROS-GARCIA Daniel**, *Dermatologie vétérinaire*
- Mme **COSTES Laura**, *Hygiène et industrie des aliments*
- M. **GAIDE Nicolas**, *Histologie, Anatomie Pathologique*
- M. **JOUSSERAND Nicolas**, *Médecine interne des animaux de compagnie*

# REMERCIEMENTS

**À Monsieur le professeur Gérard CAMPISTRON,**

*Professeur émérite à l'Université Paul Sabatier,*

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de mon jury de thèse,

Hommage respectueux.

**A Monsieur le professeur Pierre SANS,**

*Professeur à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse,*

Pour m'avoir fait l'honneur d'encadrer ce travail,

Pour ses conseils et sa disponibilité, sincères remerciements.

**A Monsieur le professeur Hubert BRUGÈRE,**

*Professeur à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse,*

Pour m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury de thèse,

Mes remerciements les plus sincères.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>12</b>
<b>PARTIE I : SITUATION ACTUELLE DE L'ENTOMOPHAGIE ET DE L'ÉLEVAGE D'INSECTES EN EUROPE.....</b>	<b>14</b>
A. CONSOMMATION ACTUELLE DANS LE MONDE.....	14
1. Caractéristiques de la consommation d'insectes dans les pays entomophages .....	14
2. La consommation d'insectes dans les pays occidentaux et en Europe.....	15
B. INSECTES CONSOMMÉS ACTUELLEMENT OU APPELÉS À ÊTRE CONSOMMÉS EN EUROPE .....	16
1. Les coléoptères, insectes les plus largement consommés à travers le monde.....	20
2. Les lépidoptères, chenilles et pupes comestibles .....	23
3. Les orthoptères, insectes sauteurs.....	24
4. Autres ordres.....	26
C. CADRE LÉGISLATIF ACTUEL POUR L'ÉLEVAGE D'INSECTES .....	27
1. Cadre législatif pour l'élevage d'insectes en général en France et en Europe .....	27
2. Cadre législatif concernant l'élevage d'insectes pour la consommation humaine ...	29
a. Évolution de la législation européenne sur l'entomophagie.....	30
b. Évolution de la législation française sur l'entomophagie.....	31
c. Évolution de la législation en Belgique et dans d'autres pays européens.....	32
D. PRODUCTEURS ET DISTRIBUTEURS D'INSECTES AUJOURD'HUI EN EUROPE	33
1. Production d'insectes dans l'Union Européenne en général .....	33
2. Production d'insectes comestibles dans l'Union Européenne .....	35
E. L'ÉLEVAGE D'INSECTES EN PRATIQUE .....	36
1. Systèmes d'élevage .....	36
a. Organisation générale d'un élevage en lien avec le mode de vie et le cycle de développement.....	36
b. Des substrats et des conditions de vie adaptés .....	37
c. Alimentation et abreuvement .....	38
2. Récolte et abattage .....	39
3. Santé des insectes d'élevage .....	41
a. Entomopathogènes connus .....	41
b. Prévention des maladies et interventions de l'éleveur face aux pathologies en élevage.....	44
c. Perspectives en matière de résistance aux pathogènes.....	45
F. TRANSFORMATION DES INSECTES ET PRODUITS DISPONIBLES SUR LE MARCHÉ EUROPÉEN .....	46
1. Transformation et techniques de conservation des insectes et produits à base d'insectes .....	46
2. Produits actuellement disponibles sur le marché européen .....	48

a.	Produits hors alimentation humaine .....	48
b.	Produits destinés à l'alimentation humaine .....	49
G.	PROJETS DE RECHERCHE EN COURS .....	50
<b>PARTIE II : APPORTS DE L'ENTOMOPHAGIE FACE AUX ENJEUX ACTUELS .....</b>		<b>53</b>
A.	ENJEUX ÉCOLOGIQUES ACTUELS ET PRODUCTION D'INSECTES .....	53
1.	Productivité des insectes et perspectives en termes d'alimentation .....	53
a.	Efficacité de conversion et bases de l'alimentation actuelle des insectes.....	54
b.	Perspectives en matière de réutilisation des déchets.....	57
2.	Emissions de gaz à effet de serre et pollution des sols.....	60
a.	Potentiel de réchauffement global.....	61
b.	Emissions de dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ) .....	62
c.	Emissions de méthane (CH <sub>4</sub> ).....	64
d.	Émissions de composés azotés .....	65
3.	Utilisation des ressources en eau .....	67
4.	Utilisation des terres agricoles.....	68
a.	Surface utilisée pour produire l'alimentation des animaux d'élevage.....	68
b.	Surface d'élevage utilisée par les animaux eux-mêmes .....	70
c.	Scénarios d'une substitution partielle de la production actuelle par d'autres produits dont les insectes.....	71
5.	Consommation d'énergie en élevage.....	72
6.	Bilan et perspectives en matière d'écologie .....	73
B.	DÉVELOPPER L'ÉLEVAGE D'INSECTES POUR NOURRIR LA PLANÈTE.....	74
1.	Composition générale des insectes et comparaison aux apports recommandés ....	75
a.	Composition des insectes en protéines et acides aminés .....	75
b.	Composition des insectes en lipides et acides gras.....	79
c.	Composition des insectes en fibres et glucides .....	80
d.	Composition des insectes en vitamines et minéraux .....	80
2.	Facteurs influençant la composition des insectes .....	81
a.	Influence de l'alimentation.....	81
b.	Influence des facteurs environnementaux.....	83
c.	Influence du stade de développement .....	83
d.	Influence des procédures de cuisson et de déshydratation.....	83
3.	Perspectives en matière d'alimentation à base d'insectes .....	84
a.	Apport en innovation culinaire .....	85
b.	Apport « médicinal » de l'entomophagie.....	86
C.	ÉLEVAGE D'INSECTES ET CONSIDÉRATIONS ÉTHIQUES.....	87
1.	Les différents aspects du bien-être animal des animaux d'élevage .....	88
a.	L'élevage.....	88
b.	Le transport.....	90

c. L'abattage .....	91
2. Principe de conscience appliqué aux insectes .....	92
3. Évolution des connaissances scientifiques sur une possible conscience et perception de la douleur chez les insectes.....	93
4. Limites des connaissances actuelles et principe de précaution.....	95
5. Perspectives lors de l'application du principe de précaution .....	96
<b>PARTIE III : FREINS ACTUELS POUR UN DÉVELOPPEMENT DE L'ENTOMOPHAGIE EN EUROPE.....</b>	<b>98</b>
A. POTENTIELS RISQUES SANITAIRES ASSOCIÉS À L'ENTOMOPHAGIE .....	98
1. Risque allergique .....	99
a. Les insectes allergisants .....	99
b. Les manifestations de l'allergie .....	101
c. Allergènes et réactions croisées .....	101
d. Effet des différents traitements appliqués aux insectes sur leur allergénicité.....	104
2. Risques infectieux.....	106
a. Risque parasitaire.....	107
b. Risque bactérien.....	109
c. Risque fongique .....	118
d. Risque viral.....	119
e. Risque lié aux prions.....	119
3. Contamination chimique des insectes.....	120
a. Les PCB, les dioxines et les retardateurs de flamme .....	120
b. Les pesticides.....	122
c. Les métaux lourds .....	123
4. Substances anti-nutritionnelles et toxiques des insectes.....	124
a. Substances toxiques des insectes.....	125
b. Substances anti-nutritionnelles des insectes .....	126
B. ACCEPTATION SOCIALE DE L'ENTOMOPHAGIE EN EUROPE .....	128
1. Les causes du rejet de l'entomophagie en Europe .....	129
2. Les motivations des consommateurs intéressés par l'entomophagie .....	130
3. Les stratégies permettant d'augmenter l'acceptabilité de la consommation d'insectes .....	132
a. Informer sur les différents aspects de l'entomophagie .....	132
b. Encourager l'expérience gustative.....	134
c. Répondre aux attentes des consommateurs.....	136
d. Privilégier certains insectes.....	139
e. Limites des études actuelles et perspectives.....	141
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>143</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>146</b>

# TABLE DES ILLUSTRATIONS

## FIGURES

FIGURE 1 : COCHENILLES DACTILOPUS COCCUS. ....	16
FIGURE 2 : PREVALENCE DES ORDRES D'INSECTES EN ALIMENTATION HUMAINE A L'ECHELLE MONDIALE.....	17
FIGURE 3 : CLASSIFICATION PHYLOGENETIQUE SIMPLIFIEE DES DIFFERENTS ORDRES D'INSECTES. ....	18
FIGURE 4 : MODELE DE DEVELOPPEMENT D'UN INSECTE HETEROMETABOLE. ....	19
FIGURE 5 : MODELE DE DEVELOPPEMENT D'UN INSECTE HOLOMETABOLE.....	19
FIGURE 6 : LARVE A MATURE ET ADULTE DE TENEBRIO MOLITOR. ....	20
FIGURE 7: LARVE MATURE ET IMAGO DE A. DIAPERINUS. ....	21
FIGURE 8 : LARVE MATURE ET IMAGO DE ZOOPHOBAS ATRATUS.....	21
FIGURE 9 : LARVES ET IMAGO DE RHYNCHOPHORUS PHOENICIS.....	22
FIGURE 10 : PUPE DE BOMBYX MORI AVEC SON COCON ET FORME ADULTE (PAPILLON). ....	23
FIGURE 11 : IMAGO ET LARVE DE GALLERIA MELLONELLA.....	24
FIGURE 12 : GRILLON DOMESTIQUE ADULTE (ACHETA DOMESTICUS). ....	25
FIGURE 13 : GRILLON TROPICAL ADULTE (GRYLLODES SIGILLATUS). ....	25
FIGURE 14 : CRIQUET MIGRATEUR ADULTE (LOCUSTA MIGRATORIA). ....	26
FIGURE 15 : LARVE ET ADULTE DE HERMETIA ILLUCENS. ....	27
FIGURE 16 : EXEMPLE DE SYSTEME D'ELEVAGE DE VERS A SOIE.....	36
FIGURE 17 : ABEILLES INFECTEES PAR UN IFLAVIRUS PRESENTANT UN DEVELOPPEMENT ANORMAL DES AILES.....	42
FIGURE 18 : DEUX EXEMPLES DE MORTALITE LARVAIRE CHEZ LE VER DE FARINE. ....	43
FIGURE 19 : INSECTES VENDUS POUR L'APERITIF (JIMINI'S).....	49
FIGURE 20 : PAIN A BASE DE FARINE D'INSECTES COMMERCIALISE EN FINLANDE. ....	50
FIGURE 21 : COMPARAISON INTERSPECIFIQUE DU POTENTIEL DE RECHAUFFEMENT GLOBAL. ....	62
FIGURE 22 : SURFACES NECESSAIRES POUR LA PRODUCTION D'1 KG DE PROTEINES POUR QUATRE ESPECES COMPAREES.....	69
FIGURE 23 : APERÇU D'UN ELEVAGE DE VERS DE FARINE AVEC DES COLONNES DE BACS DANS LESQUELS SE TROUVENT LES VERS.....	71
FIGURE 24 : COMPARAISON DE L'UTILISATION DES TERRES AGRICOLES POUR LES DIFFERENTS SCENARIOS IMAGINES OU 50% DES APPORTS EN ENERGIE ET PROTEINES EST REMPLACE PAR LE TYPE DE PRODUCTION INDIQUE.....	72
FIGURE 25 : COMPOSITION MOYENNE EN NUTRIMENTS POUR CHAQUE ORDRE D'INSECTES.....	76
FIGURE 26 : PROFILS COMPARES EN ACIDES AMINES POUR LES DIFFERENTS ORDRES D'INSECTES. ....	78
FIGURE 27 : APERÇU DU SYSTEME D'ELEVAGE VERTICAL DE VERS DE FARINE COMESTIBLES DE L'ENTREPRISE MICRONUTRIS.....	89
FIGURE 28 : SCHEMA SIMPLIFIE DU SYSTEME NERVEUX D'UN INSECTE. ....	95
FIGURE 29 : REPRESENTATION SIMPLIFIEE DE L'EMBRANCHEMENT ARTHROPODES. ....	103
FIGURE 30 : CHENILLE DE THAUMETOPOEA PITYOCAMPA PRESENTANT DES SOIES URTICANTES	125
FIGURE 31 : PAPILLON DU GENRE SYNTHOMIS .....	125
FIGURE 32 : BARRE ENERGETIQUE A BASE DE FARINE DE GRILLON PROPOSEE PAR LA MARQUE KINJAO.....	133
FIGURE 33 : IMAGES PROPOSEES PAR GMUER ET AL. AUX PARTICIPANTS DE LEUR ETUDE. ....	137
FIGURE 34 : BOULETTES ET "STEACK" A BASE D'INSECTES COMMERCIALISES PAR L'ENTREPRISE SUISSE ESSENTO.....	138
FIGURE 35 : DIFFERENCE D'ACCEPTATION ENTRE ESPECES D'INSECTES ET SELON L'EXISTENCE D'UNE EXPERIENCE ANTERIEURE D'ENTOMOPHAGIE OU NON. ....	140

## TABLEAUX

TABLEAU 1 : TABLEAU RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES DE DEVELOPPEMENT DE TROIS ESPECES DE VERS DE FARINE.....	22
TABLEAU 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU DEVELOPPEMENT DE TROIS ORTHOPTERES COMESTIBLES.....	26
TABLEAU 3 : STADES DE RECOLTE ET DUREE D'ELEVAGE DES ESPECES COURAMMENT CONSOMMEES EN EUROPE. ....	40

## INTRODUCTION

D'ici 2050, la population mondiale pourrait atteindre 9 milliards de personnes, ce qui implique une augmentation majeure de la production de nourriture, jusqu'à quasiment la doubler. Les terres encore disponibles pour produire notre alimentation se font rares, et étendre les terres agricoles est une solution souvent peu durable. Par ailleurs, la surpêche, le réchauffement climatique et la limite des ressources en eau sont des phénomènes qui poussent à réfléchir à de nouvelles manières de produire notre alimentation. Aujourd'hui déjà, plus d'un milliard de personnes souffrent de malnutrition dans le monde, il est donc nécessaire d'augmenter l'efficacité de la production, de diminuer le gâchis alimentaire, et de trouver d'autres manières de produire afin de prétendre atteindre les objectifs de couverture des besoins de la planète (FAO and Van Huis, 2013).

Les insectes ont toujours fait partie de l'alimentation humaine, même si leur consommation avait jusqu'à ces dernières années disparu des habitudes alimentaires dans les pays occidentaux. Dans les pays entomophages, les insectes consommés sont principalement issus d'une récolte dans leur milieu naturel, mais de plus en plus, des systèmes d'élevage de masse se développent à travers le monde et notamment en Europe. Le rapport de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation) produit en 2013 est à l'origine d'une dynamique pour les recherches sur l'entomophagie : l'organisation considère en effet la production d'insectes comme une possibilité de répondre à la problématique alimentaire actuelle, aussi bien dans les pays développés qu'émergents. Les insectes présentent des qualités nutritionnelles importantes et leur production peut être à la fois efficace et durable, ce qui correspond aux besoins d'évolution actuels des productions animales (FAO and Van Huis, 2013).

En Europe, la barrière principale semble être l'acceptation sociale de l'entomophagie, les insectes étant culturellement loin d'être considérés comme comestibles mais, au contraire, comme nuisibles (parasites, vecteurs de maladies,...). Les risques liés à une telle consommation seraient limités, mais jusqu'ici peu contrôlés et étudiés dans les pays qui en consomment de manière traditionnelle (van Huis, 2016). La législation européenne ne permet pas actuellement la production d'insectes pour la consommation humaine, mais des élevages existent déjà pour nourrir les poissons d'élevage et les animaux de compagnie. Certains pays comme la Belgique et les Pays-Bas appliquent une politique de tolérance qui permet des débouchés en alimentation humaine. Ainsi, la production d'insectes se développe en Europe depuis

les années 2010, et suscite de plus en plus l'intérêt des consommateurs (ANSES, 2015).

L'entomophagie est donc un sujet d'actualité et de nombreuses publications ont vu le jour depuis ces dix dernières années et d'autant plus depuis la parution du rapport de la FAO en 2013. Dans un premier temps, un état de lieux de la production et de la consommation d'insectes en Europe sera fait. Puis, les grands enjeux actuels auxquels semblent pouvoir répondre un développement de telles pratiques seront expliqués. Enfin les barrières actuelles seront étudiées afin d'évaluer la possibilité d'un réel accroissement de l'entomophagie en Europe.

# **PARTIE I : SITUATION ACTUELLE DE L'ENTOMOPHAGIE ET DE L'ÉLEVAGE D'INSECTES EN EUROPE**

## **A. CONSOMMATION ACTUELLE DANS LE MONDE**

### **1. Caractéristiques de la consommation d'insectes dans les pays entomophages**

La consommation d'insectes est une pratique ancienne pour l'espèce humaine qui, si elle a totalement disparu dans certaines parties du monde, se maintient notamment en Asie, Afrique et Amérique latine (van Huis, 2013). Cette consommation est principalement basée sur une récolte dans la nature et non sur des insectes élevés pour la consommation. Ainsi, elle est très dépendante de l'abondance des insectes et donc des régions, des saisons et des connaissances des « chasseurs d'insectes » sur ces animaux. Ces récoltes sont des sources de revenu non négligeables, et ce sont principalement les femmes (voire les enfants) qui se chargent de la récolte et de la commercialisation (locale sur les marchés en général) (van Huis, 2016; Ramos-Elorduy, 2008).

Les insectes viennent souvent compléter un régime alimentaire parfois pauvre en protéines et à l'origine de carences aux effets parfois désastreux sur certaines populations. Le rapport publié par la FAO en 2013 souligne ainsi que le développement de la consommation d'insectes pourrait contribuer à la lutte contre la malnutrition dans certains pays émergents (FAO et al., 2013).

Dans les pays en voie de développement, les insectes sont vus comme ressources utiles mais pas toujours comme quelque chose de positif car ils font référence à une alimentation ancestrale et plutôt rurale qui ne va pas dans le sens d'un développement avec augmentation du pouvoir d'achat. Ainsi, la tendance est inversée par rapport à la population occidentale qui va préférer des produits évoquant le « retour à la nature » alors que les populations des pays en voie de développement se dirigent plus facilement vers des produits transformés (Ramos-Elorduy, 2008).

On trouve en général des insectes entiers, cuits ou fumés, parfois déshydratés, souvent sur des marchés où les personnes qui les ont récoltés les revendent. Cette consommation, basée sur les récoltes d'insectes dans le milieu naturel, pose des questions de développement durable et de biodiversité, avec le risque de

surexploitation voire d'extinction de certaines espèces (van Huis, 2016). Ce modèle n'est de plus par reproductible dans des régions de la planète où le climat permet uniquement le développement d'insectes de petite taille et en petite quantité (climat tempéré) et donc non suffisant pour être introduits en quantité significative dans l'alimentation. Une collecte dans la nature empêche aussi un réel contrôle des produits mis sur le marché et induit donc de potentiels risques pour la santé des consommateurs. Ainsi, c'est vers un système d'élevage d'insectes que se tourne aujourd'hui le monde occidental qui s'intéresse à l'entomophagie (van Huis, 2016).

Dans un premier temps, des « proto-élevages » ont vu le jour : il s'agit de favoriser la présence de l'insecte à un endroit précis, en lui fournissant un cadre de vie adapté (alimentation, substrat) ce qui permet de le récolter plus facilement : c'est le cas notamment pour le charançon du palmier en Afrique centrale (Ramos-Elorduy, 2008). De véritables élevages existent désormais à travers le monde pour de nombreuses espèces d'insectes, mais cette évolution est récente et reste limitée à certaines régions (en Asie principalement).

## **2. La consommation d'insectes dans les pays occidentaux et en Europe**

Dans les pays occidentaux, et notamment en Europe, l'entomophagie ne fait plus partie de la tradition culinaire et alimentaire, et est vue aujourd'hui comme une nouveauté dans nos cultures, une expérience « exotique ».

La consommation d'insectes en Europe, et notamment en France, n'est cependant pas nulle. *Le Codex Alimentarius* fixe à ce sujet un pourcentage de la part d'insectes à ne pas dépasser pour les farines et les graines alimentaires : 0,1%. En effet, les produits à base de céréales notamment, peuvent contenir une certaine proportion de fragments d'insectes qui sont donc consommés notamment dans notre pays grand consommateur de pain. On estime ainsi à 500 g la quantité d'insectes consommée de manière involontaire par un français en une année (Terrien, 2018).

Un second aspect de la consommation d'insectes que la plupart des gens ignore, est l'utilisation du colorant E120. Plus connu sous le nom de colorant carmin (couleur rouge), cet additif est issu d'un insecte : la femelle cochenille *Dactilopius coccus* élevée sur des cactus du genre *Opuntia* (Figure 1). L'acide carminique est obtenu à partir des carapaces séchées de l'insecte et il est ensuite mélangé à d'autres éléments pour

obtenir le colorant carmin. Il existe des colorants carmin artificiels, mais le plus répandu à une échelle industrielle reste le colorant carmin issu d'acide carminique qui est donc largement consommé (confiseries, viandes, boissons aromatisées, pâtisseries)(additifs-alimentaires.net, site internet).



Figure 1 : Cochenilles *Dactilopus coccus*.  
Source : [additif-alimentaires.net](http://additif-alimentaires.net)

Ainsi, la consommation d'insectes en Europe semble anecdotique et principalement involontaire. Le développement d'une consommation d'insectes volontaire voit le jour depuis une dizaine d'années dans les pays de l'Union Européenne, dans un contexte où le développement de l'entomophagie est encouragé par la FAO (FAO et al., 2013). Les insectes étant désormais accessibles notamment en ligne, de plus en plus de personnes en Europe tentent l'expérience de l'entomophagie. Mais bien qu'il n'existe actuellement pas de chiffres estimant le nombre de personnes ayant réellement intégré les insectes à leur régime alimentaire, cette population est très minoritaire à ce jour (ANSES, 2015).

## **B. INSECTES CONSOMMÉS ACTUELLEMENT OU APPELÉS À ÊTRE CONSOMMÉS EN EUROPE**

D'après le rapport de la FAO présenté en 2013 (FAO et al., 2013), il existerait plus de 1 900 espèces d'insectes consommées dans le monde, et ce chiffre augmente encore au fil des recherches menées sur de nouvelles espèces. Différents ordres sont concernés par cette consommation mais dans des proportions diverses présentées sur la Figure 2.

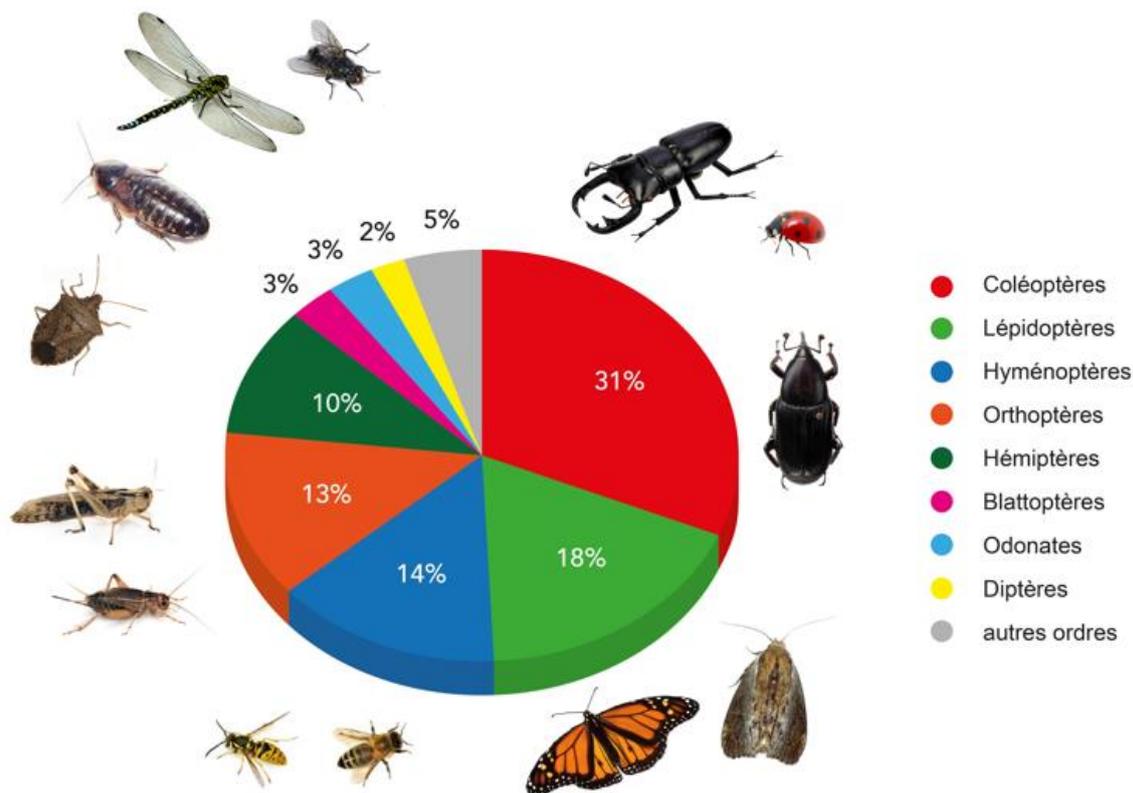


Figure 2 : Prévalence des ordres d'insectes en alimentation humaine à l'échelle mondiale. D'après FAO, 2013.

Mais tous ces insectes ne peuvent pas être de bons candidats à l'élevage à grande échelle, compte tenu de certaines caractéristiques physiques ou physiologiques. Par exemple, un insecte dont le mode de vie est basé principalement sur des déplacements en vol sera plus difficile à élever dans des conditions adaptées à son mode de vie naturel. Selon Pali-Schöll et al., un bon candidat à l'élevage industriel est un insecte présentant une croissance plutôt rapide dans des conditions climatiques faciles à entretenir, de préférence avec une alimentation peu chère et largement disponible. Un comportement social assez marqué est un élément positif pour pouvoir vivre avec des densités importantes d'individus sans qu'il y ait de cannibalisme. Les espèces elles-mêmes insectivores présentent peu d'intérêt car nécessiteraient un élevage de masse parallèle d'autres insectes pour leur propre consommation, ce qui ferait perdre au système de son intérêt en termes de productivité (Pali-Schöll et al., 2018). D'après ces différentes problématiques, certains groupes d'espèces sont donc plus indiqués :

- espèces tropicales et subtropicales vivant sous des conditions climatiques peu changeantes (criquets, grillons)
- espèces vivant proche de l'homme (blattes)
- espèces se développant dans les aliments stockés par l'homme (ténébrions)

- charognards et détritivores (mouches)

Si les insectes sont couramment tous regroupés sous ce même terme, il existe une grande variabilité au sein de cette classe d'invertébrés (physiologie, mode de développement, mode de vie). Il est donc intéressant dans le cadre d'un élevage de connaître précisément les besoins de chaque espèce ou groupe d'espèces. Les différents ordres peuvent être classés de la manière suivante (Figure 3) :

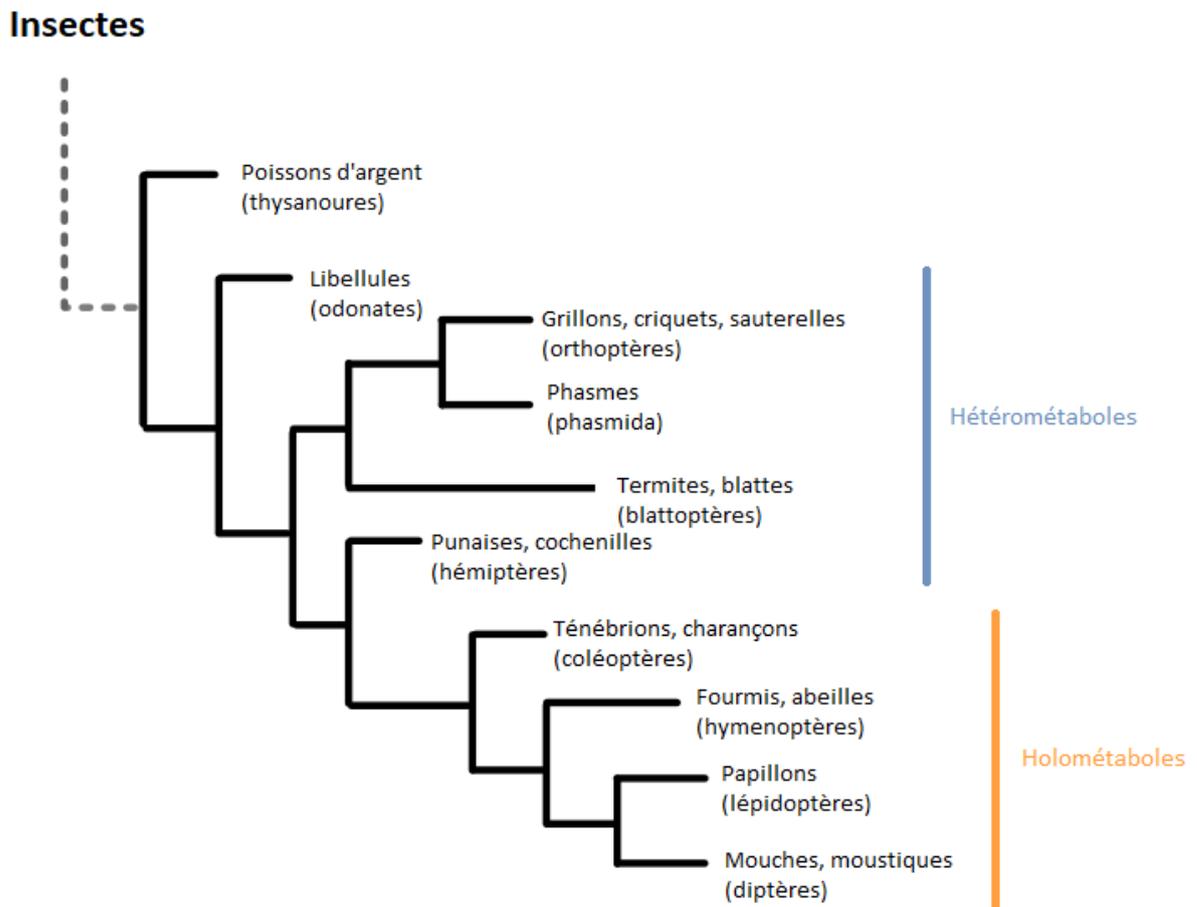


Figure 3 : Classification phylogénétique simplifiée des différents ordres d'insectes.  
D'après locust.cirad.fr et insectes.org.

Il existe différents types de développement chez les insectes : on distingue ainsi principalement les holométaboles des hétérométaboles.

Les hétérométaboles ont des larves identiques ou presque aux adultes. Il n'y a pas de métamorphose complète du corps, pas de stade immobile entre la larve et l'adulte. En général, les larves mènent la même vie que les adultes et ont le même régime alimentaire, mais elles ne possèdent pas d'ailes et ne peuvent pas se reproduire (orthoptères, blattoptères, phasmida, hémiptères...). On distingue ensuite

deux sous catégories de ce développement : les paurométaboles pour lesquels adultes et larves occupent le même milieu (aquatique ou aérien) et les hémimétaboles (libellules et éphémères principalement) dont la larve est aquatique alors que l'adulte est aérien.

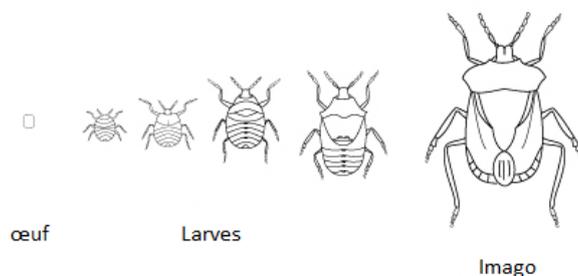


Figure 4 : Modèle de développement d'un insecte hétérométabole.  
D'après wsu.edu.

Les holométaboles ont des larves très différentes des adultes, leur milieu et mode vie sont souvent différents. La larve passe par une métamorphose complète au cours d'un stade immobile : la nymphe. Ce développement concerne notamment les coléoptères, les lépidoptères et les diptères.

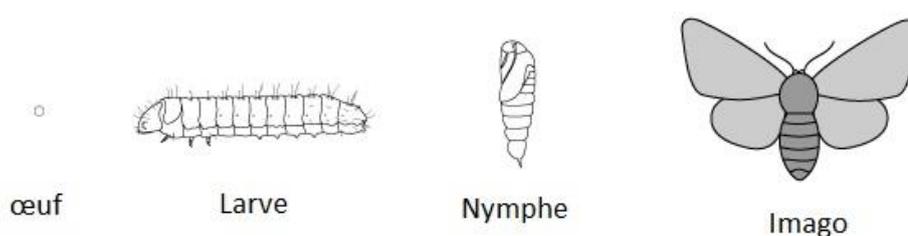


Figure 5 : Modèle de développement d'un insecte holométabole.  
D'après wsu.edu.

La mise en place d'un élevage doit donc tenir compte du mode de développement de l'insecte choisi, ses besoins évoluant au cours de sa vie.

## 1. Les coléoptères, insectes les plus largement consommés à travers le monde

Comme indiqué précédemment, certains coléoptères sont élevés en Europe et ailleurs, étudiés depuis plusieurs décennies par les scientifiques. On parle ici principalement des ténébrions communément appelés « vers de farine », qui sont les larves de différentes espèces de coléoptères de la famille des ténébrionidés. Les connaissances sur ces insectes se sont rapidement étendues principalement parce que ces animaux se développent dans la farine comme leur nom l'indique, donc de manière générale dans divers produits céréaliers de l'agriculture destinés à la consommation humaine. Il s'agissait donc à l'origine d'en apprendre plus sur ces insectes dans le but de les éliminer car leur potentiel destructeur des récoltes n'était pas négligeable. Dans certaines régions du monde, ils sont cependant vus comme des ressources alimentaires depuis des siècles (Ramos-Elorduy, 2008). En effet, ces larves se développent dans des milieux clos, non exposés à la lumière et à des densités importantes. Ils se nourrissent à l'origine de céréales, mais de nombreuses recherches sont en cours concernant l'élaboration d'un régime présentant des bénéfices plus importants en termes d'écologie (Van Broekhoven et al., 2015).

Ce sont aujourd'hui les insectes les plus représentés en termes d'élevage en Europe et en France, principalement dans le cadre de l'alimentation animale, mais de plus en plus avec des perspectives pour l'alimentation humaine.

Le ténébrion meunier, *Tenebrio molitor* est le plus largement produit aujourd'hui en Europe. Il se nourrit de produits céréaliers, mais consomme aussi des fruits et des légumes.



Figure 6 : Larve à maturité et adulte de *Tenebrio molitor*.  
Source : [insectescomestibles.com](http://insectescomestibles.com)

Le ver buffalo ou petit ténébrion, *Alphitobius diaperinus* est lui aussi produit en Europe, pour la consommation animale mais aussi humaine. Il infeste de la même façon les farines et autres produits céréaliers, ainsi que d'autres productions végétales (coton, tabac). On le trouve aussi dans les poulaillers et nids, vivant dans la litière et pouvant être responsable de la transmission de certains pathogènes au sein d'un élevage (Dunford and Kaufman, 2006).



Figure 7: Larve mature et imago de *A. diaperinus*.  
Source : [jozibugs.co.za](http://jozibugs.co.za)

Le ver de farine géant, *Zophobas atratus*, est actuellement produit pour l'alimentation animale uniquement. Ce ténébrion est trouvé à l'état naturel dans le guano de chauve-souris et dans la litière de manière générale (Kim et al., 2015b). Son alimentation est assez variable comme pour les autres vers de farine, les produits céréaliers et les légumes étant tout à fait adaptés à son développement.



Figure 8 : Larve mature et imago de *Zoophobas atratus*.  
Sources : [ufl.edu](http://ufl.edu) ; [insectescomestibles.com](http://insectescomestibles.com)

Le tableau suivant regroupe les caractéristiques principales du développement des différentes espèces de vers de farine élevées actuellement (Tableau 1).

Nom vernaculaire	Espèce	Taille de la larve (mm)	Temps de développement de la larve (température optimale)	Nombre de stades larvaires	Milieu de vie naturel
Ténébrion meunier	<i>Tenebrio molitor</i>	20-35	80 jours	14 à 20	Produits céréaliers stockés (farine, son)
Ver de farine géant	<i>Zophobas atratus</i>	40-55	110 jours	15 à 18	Guano de chauve-souris, litière organique
Ver buffalo	<i>Alphitobius diaperinus</i>	7-11	40 jours	6 à 11	Produits céréaliers, litière de poulaillers

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des caractéristiques de développement de trois espèces de vers de farine. D'après Kim et al., 2015 ; Dunford et al., 2006 ; Van broekoven et al., 2015 ; Park et al., 2012 ; Park et al., 2014.

La larve de charançon du palmier, *Rhynchophorus phoenicis*, est consommée principalement en Afrique centrale. Actuellement, ces larves parasites des palmiers raphias sont récoltées et vendues sur les marchés africains, mais des essais d'élevages sont en cours étant donné les qualités nutritives de l'insecte (Fogang Mba et al., 2017). Cet insecte semble avoir un rôle important à jouer face à la malnutrition qui touche certaines populations africaines.



Figure 9 : Larves et imago de *Rhynchophorus phoenicis*.  
Source : site internet de l'INRA ; coleopteraatlas.com.

## 2. Les lépidoptères, chenilles et pupes comestibles

L'ordre des lépidoptères contient l'ensemble des papillons et des mites. Ils sont holométaboles et leur larve est habituellement désignée par le terme « chenille ». Le passage par un stade nymphal protégé par un cocon permet la transformation de la chenille en papillon.

Le bombyx murier, *Bombyx mori*, est l'espèce de papillon la plus emblématique pour la production de soie. La chenille se nourrit de feuilles de murier, puis lorsqu'elle entre en phase de pupaison, elle se construit un cocon protecteur formé de soie. À l'état naturel, la pupe libère une enzyme pour libérer le papillon et donc détruit en partie le cocon. En élevage, l'ensemble cocon et pupe est ébouillanté avant libération afin de récupérer un cocon intact : les pupes sont alors commercialisées comme sous-produits de la production de soie (on obtient 1 kg de soie pour 8 kg de pupes fraîches). Les pupes sont utilisées pour l'alimentation animales (porcs et volailles), comme fertilisants, pour l'extraction d'huile et de chitine mais aussi en alimentation humaine. Cette consommation est principalement basée en Asie, surtout Chine, Thaïlande, Japon et Inde (Makkar et al., 2014).



Figure 10 : Pupe de *Bombyx mori* avec son cocon et forme adulte (papillon).  
Source : [life.illinois.edu](http://life.illinois.edu)



La fausse teigne de la cire, *Galleria mellonella*, est un parasite des ruches en Europe : la larve se nourrit des rayons de cire. Ses facultés à consommer certains plastiques (polyéthylène) ont été découvertes en 2017 et elle est actuellement étudiée pour envisager son intérêt pour l'environnement. En alimentation, elle est utilisée pour les animaux de compagnie et de zoo insectivores et ses qualités nutritionnelles sont reconnues. Les larves de gallérie sont aussi élevées pour l'alimentation humaine et commercialisée notamment en Belgique (Francardi et al., 2017).



Figure 11 : Imago et larve de *Galleria mellonella*.  
Source : biblio.cz et WUR, 2018.

### 3. Les orthoptères, insectes sauteurs

Les orthoptères regroupent les insectes que l'on nomme couramment grillons, criquets et sauterelles. Ils sont paurométaboles donc ne subissent pas de métamorphose complète et les larves ressemblent aux adultes. Plus de 80 espèces appartenant à cet ordre sont consommées à travers le monde, principalement récoltées dans la nature. Il existe des élevages notamment en Thaïlande pour la production de ces insectes dans le cadre de l'alimentation animale (zoos et reptiles et oiseaux de compagnie). Les criquets et sauterelles sont le plus souvent des ravageurs de culture, à l'image des chapulines (genre *Sphenarium*) au Mexique et des criquets de Bombay (*Nomadacris succincta*). Leur récolte et leur consommation sont alors encouragées, limitant la destruction des cultures et l'utilisation de pesticides (Makkar et al., 2014).

Le grillon domestique, *Acheta domesticus*, est présent en Europe où il se trouve plutôt en intérieur dans les régions froides (température optimale autour de 30°C). Son élevage est assez aisé, et il est largement utilisé en alimentation animale (reptiles de compagnie) et de plus en plus en alimentation humaine (entiers ou sous forme de farine) (WUR, 2018).



Figure 12 : Grillon domestique adulte (*Acheta domesticus*).  
Source : [insectescomestibles.com](http://insectescomestibles.com)

Le grillon tropical, *Grylloides sigillatus*, vit naturellement dans les régions tropicales et subtropicales. Il appartient lui aussi à la famille des Gryllidés et vit à des températures autour de 30°C. Il est actuellement un bon candidat pour l'entomophagie et est déjà produit en Europe, et notamment en France (WUR, 2018).



Figure 13 : Grillon tropical adulte (*Grylloides sigillatus*).  
Source : WUR, 2018

On peut aussi citer le grillon provençal (*Gyllus bimaculatus*) que l'on trouve en Europe, et qui est aujourd'hui produit pour l'alimentation animale uniquement (animaux de zoo et de compagnie principalement) (WUR, 2018). L'ensemble de la famille des Gryllidés est principalement herbivore mais ce régime est très adaptable en fonction des ressources (existence de cannibalisme notamment). Ils sont globalement faciles à élever, à condition que la densité et la température soient adaptées.

Les criquets sont eux aussi consommés et élevés pour l'alimentation animale et humaine. En particulier, le criquet migrateur, *Locusta migratoria*, est commercialisé en Europe depuis plusieurs années pour la consommation humaine. Cette espèce

appartenant à la famille des acrididés, est à l'origine un ravageur des cultures, formant des nuées très destructrices notamment en Asie (Cirad, 2007).



Figure 14 : Criquet migrateur adulte (*Locusta migratoria*).  
Source : insectescomestibles.fr

Nom vernaculaire	Nom latin	Taille de l'insecte consommé	Temps de développement jusqu'à récolte (température optimale)	Milieu de vie naturel
<b>Grillon domestique</b>	Acheta domesticus	16-20 mm	2-3 mois	Maisons, métro parisien
<b>Grillon tropical</b>	Gryllodes sigillatus	12-22 mm	2-3 mois	Régions chaudes
<b>Criquet migrateur</b>	Locusta migratoria	42-72 mm	3 mois	Extérieur, plantations

Tableau 2 : Principales caractéristiques du développement de trois orthoptères comestibles.  
D'après Cirad, 2007 ; Clifford & Woodring, 1990 ; Makkar et al., 2014 ; WUR, 2018.

#### 4. Autres ordres

Comme évoqué précédemment, il existe d'autres espèces d'insectes élevées à travers le monde pour la nutrition humaine, et d'autres déjà élevées en Europe mais dans le cadre de l'alimentation animale.

Parmi les diptères, on s'intéresse notamment à la mouche soldat noire, *Hermetia illucens* (famille : Stratiomyidae). Elle est actuellement élevée en Europe et en France pour son fort potentiel dans le recyclage des déchets et dans le même temps de production de protéines animales lorsqu'elle est consommée par la suite (consommation animale uniquement) (Makkar et al., 2014). La mouche domestique, *Musca domestica*, aurait, elle aussi, un certain potentiel pour le recyclage des déchets et l'alimentation animale.



Figure 15 : Larve et adulte de *Hermetia illucens*..  
Source : WUR, 2018.

Ces insectes ont tous leurs particularités, même si on trouve des ressemblances au sein d'un même ordre. Comme pour les animaux d'élevage conventionnels, on peut imaginer une sélection menée sur certaines espèces menant à l'apparition de lignées plus adaptées au système d'élevage et donc à l'origine de meilleures performances (van Huis, 2016).

## C. CADRE LÉGISLATIF ACTUEL POUR L'ÉLEVAGE D'INSECTES

### 1. Cadre législatif pour l'élevage d'insectes en général en France et en Europe

Concernant la détention d'insectes, il n'y a pas de réglementation spécifique à ces espèces qui ne font pas partie des espèces domestiques mais des espèces « sauvages ». Leur détention relève donc de la réglementation sur la « faune sauvage captive » (selon le Code l'Environnement) : pour ouvrir un établissement, il faut donc

obtenir un certificat de capacité pour les espèces élevées ainsi qu'une autorisation préfectorale d'ouverture (ANSES, 2015).

Concernant les règles d'hygiène s'appliquant à la production d'animaux pour la consommation humaine, il s'agit des règles générales établies par le paquet hygiène, et plus précisément par le règlement (CE) n°178/2002 visant l'innocuité pour l'Homme. Le paquet hygiène s'applique à toutes les étapes de la production, de la transformation et de la distribution des denrées alimentaires et des aliments pour animaux, incluant implicitement aussi les insectes.

Les producteurs et distributeurs d'insectes et/ou de produits à base d'insectes relèvent du règlement européen sur l'hygiène des denrées alimentaires d'origine animale (Règlement (UE) n°854/2004 2004) et des aliments pour animaux (Règlement (UE) n°183/2005 2005). Les principes HACCP (Analyse des dangers – points critiques pour leur maîtrise) doivent donc être appliqués.

Pour l'alimentation des animaux d'élevage destinés à produire des aliments, la législation européenne définit des substrats autorisés et exclut ainsi les catégories suivantes de l'alimentation animale (ANSES, 2015) :

- le lisier ou fumier
- le bois traité
- les déchets de cuisine et de table

Les déchets provenant de la production de bioéthanol, comme les protéines de blé et les résidus d'orge, sont quant à eux répertoriés dans le catalogue des matières premières utilisables en élevage et peuvent donc être utilisés en élevage d'insectes.

Si l'on s'intéresse plus précisément à la production d'insectes pour l'alimentation animale, les insectes sont cités implicitement comme matière première autorisée par le règlement (UE) n°68/2013 : « les invertébrés terrestres entiers ou non autres que les espèces pathogènes pour l'être humain ou les animaux ». Comme toute matière première destinée à l'alimentation animale, les aliments à base d'insectes doivent respecter la réglementation sur les substances indésirables dans les aliments pour animaux (Directive 2002/32/CE). La réglementation sur les produits formulés à base d'animaux (Règlement UE n°1069/2009) s'applique aussi (y compris pour les produits importés) et considère les insectes (invertébrés non pathogènes pour l'homme) comme matières de catégorie 3, utilisés pour :

- l'alimentation des animaux de rente (si transformés en protéines hydrolysées)
- l'alimentation des animaux de compagnie (sous certaines conditions de transformation)
- l'alimentation des animaux à fourrure, de zoo, de cirque et autres animaux sauvages détenus (avec obtention d'autorisation spécifique aux différentes situations).

En ce qui concerne les PAT (Protéines Animales Transformées, issues uniquement d'animaux propres à la consommation humaine donc appartenant à la catégorie 3), leur utilisation est autorisée en aquaculture depuis juin 2013 si elles proviennent d'animaux non ruminants (Règlement (UE) n°56/2013) (ANSES, 2015). Depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2017, les PAT dérivées d'insectes et les aliments composés pour animaux contenant de telles PAT sont autorisées au sein de l'Union Européenne (Règlement (UE) 2017/893). Cependant, cela concerne uniquement l'alimentation des poissons d'élevage et des animaux de compagnie, et non celle des porcs et des volailles d'élevage (Commission Européenne, 2017). Les farines doivent être uniquement produites à partir des espèces d'insectes suivantes citées par l'EFSA en 2015 (EFSA Scientific Committee, 2015) :

- Mouche soldat noire (*Hermetia illucens*),
- Mouche domestique (*Musca domestica*),
- Ténébrion meunier (*Tenebrio molitor*),
- Petit ténébrion mat (*Alphitobius diaperinus*),
- Grillon domestique (*Acheta domesticus*),
- Grillon domestique tropical (*Gryllodes sigillatus*),
- Grillon des steppes (*Gryllus assimilis*)

## **2. Cadre législatif concernant l'élevage d'insectes pour la consommation humaine**

La législation de l'Union Européenne semble aujourd'hui être le principal frein à la généralisation d'une production d'insectes en Europe. Cependant, avec la pression des différents organismes œuvrant dans ce domaine, celle-ci a récemment évolué et il est à prévoir qu'elle évoluera dans un sens plutôt en faveur de cette production dans les prochaines années. Cette évolution ne pourra se faire que sur la base de

recherches scientifiques approfondies notamment en termes de risque sanitaire encouru par la population (FAO et al., 2013).

#### **a. *Évolution de la législation européenne sur l'entomophagie***

Jusqu'au 31 décembre 2017, c'est le règlement (CE) 258/97 qui encadrait la mise sur le marché d'insectes pour la consommation humaine. Les insectes et dérivés d'insectes étaient alors considérés de manière implicite comme « novel food » (« nouvel aliment ») : il s'agit d'aliments n'ayant pas été consommés dans des proportions significatives dans l'Union Européenne avant 1997. Cette production était donc soumise à autorisation avant mise sur le marché après l'instruction d'un dossier qui devait notamment présenter les risques liés à cette production. Le dossier était d'abord étudié au niveau d'un Etat, en France par la Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes (DGCCRF), qui prenait une décision communiquée par la suite à la Commission Européenne et autres états membres. Si la décision était remise en cause par un Etat membre, l'EFSA (Agence Européenne de la Sécurité des Aliments) était alors saisie par la Commission pour une évaluation complémentaire préliminaire à la décision d'autorisation ou de non autorisation. L'autorisation était délivrée nominativement au pétitionnaire (ANSES, 2015; Note de service DGAL, 2017).

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2018, la loi européenne a évolué et la production d'insectes pour l'alimentation humaine est maintenant encadrée par le nouveau règlement (EU) 2015/2283. Les insectes sont désormais considérés comme « novel food » mais de manière explicite. La procédure est simplifiée : la demande d'autorisation (avec justification de l'innocuité de la denrée) se fait directement à la Commission Européenne (et non plus au niveau de l'Etat), celle-ci pouvant toujours saisir l'EFSA pour un avis préalable à la décision finale. L'autorisation européenne, si elle est donnée, deviendra « générique », donc ne sera pas seulement nominative pour le pétitionnaire. Il existe désormais une liste de l'Union sur laquelle s'inscriront les « nouveaux aliments » au fur et à mesure des autorisations données : la mise sur le marché sera alors uniquement possible pour des produits inscrits sur cette liste. La DGCCRF reste l'autorité compétente pour la mise en application de ce règlement en France (Note de service DGAL, 2017).

Une fois l'autorisation européenne de mise sur le marché obtenue, l'entreprise agroalimentaire devra déclarer son activité au titre du règlement sanitaire pour la consommation humaine (CE) n°852/2004 et de l'article R. 233-4 du Code rural et de la pêche maritime. Les règlements (CE) n° 178/2002 et 852/2004 rendent obligatoires la mise en place d'un plan de maîtrise sanitaire. Cependant, les insectes ne relevant d'aucune section de l'annexe III du règlement (CE) n°853/2004, leur mise sur le marché ne nécessitera pas dans ces conditions d'agrément sanitaire.

Actuellement, aucune demande dans le secteur de la production d'insectes n'a été acceptée par cette procédure au niveau européen. Cependant, certains états prennent la liberté d'instaurer une politique de tolérance vis-à-vis de certaines espèces et de certains produits dérivés au niveau national. En effet, des producteurs commercialisent déjà des insectes en France et dans d'autres pays en Europe, ce qui oblige les Etats à prendre des décisions pour une meilleure gestion de cette production, alors que la législation européenne ne reconnaît pas encore ce type d'élevage comme « autorisé ».

#### ***b. Évolution de la législation française sur l'entomophagie***

Si une politique de tolérance a été mise en place dans certains pays de l'Union, ce n'est pas le cas en France où il est officiellement interdit de produire et de vendre des insectes dans le cadre d'une consommation humaine.

Suite à l'avis favorable de la FAO concernant le développement à une échelle mondiale de la production d'insectes (FAO et al., 2013) et la demande d'études scientifiques approfondies sur le sujet, l'ANSES a produit un rapport en avril 2015 : l'agence développe les différents points pouvant présenter un risque dans l'utilisation des insectes en alimentation humaine. Cette étude conclut qu'il ne pourra y avoir de consommation d'insectes autorisée que lorsque des études plus poussées sur les risques encourus auront été menées (ANSES, 2015).

En attente d'autorisations européennes ou d'une politique de tolérance appliquée en France, la production et la commercialisation d'insectes pour l'alimentation humaine restent limitées dans le pays car non autorisées réglementairement. Les organisations d'éleveurs et différents acteurs du secteur

militent pour une évolution de la loi et notamment la Fédération Française des Producteurs Importateurs et Distributeurs d'Insectes (FFPIDI) aide à l'élaboration de dossiers solides pour être soumis à la Commission Européenne.

**c. Évolution de la législation en Belgique et dans d'autres pays européens**

En Belgique, une politique de tolérance a été appliquée avant le 1<sup>er</sup> janvier 2018 avec constitution d'une liste positive de 10 espèces d'insectes pouvant être produits et vendus pour la consommation humaine (12 étaient alors sur le marché), sur un avis commun de l'Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire (AFSCA) et du Conseil Supérieur de la Santé (CSS) en 2014, après étude des risques potentiels (AFSCA and CSS, 2014). Chaque opérateur de la filière doit être enregistré auprès de l'AFSCA et obéir à des règles sanitaires précises, avec contrôle des intrants, des conditions d'élevage, du traitement et de la conservation des produits avant distribution pour la consommation.

Un prolongement de cette tolérance est possible après la parution du nouveau règlement européen de janvier 2018 pour toute autorisation concernant les espèces et les formes de produits précédemment autorisées. Ainsi, la production et la vente pour l'alimentation humaine des dix espèces suivantes est tolérée dans certaines conditions et sous certaines formes clairement définies (AFSCA and CSS, 2014; Reverberi, 2017) :

- 2 espèces de grillons (*Acheta domesticus* et *Gryllodes sigillatus*),
- 2 espèces de criquets (dont *Locusta migratoria*)
- 3 espèces de vers de farine (dont *Tenebrio molitor* et *Alphitobius diaperinus*)
- 2 espèces de teignes (*Galleria mellonella* et *Achroia grisella*)
- 1 espèce de ver à soie (*Bombyx mori*).

Comme la Belgique, d'autres pays européens ont instauré une politique de tolérance afin de développer et encadrer la production et la commercialisation d'insectes pour l'alimentation humaine au niveau de l'état :

- les Pays-Bas (depuis 2014, avec le producteur majeur en Europe Krecafood),
- la Finlande (depuis 2017, avec l'entreprise Fazer),
- la Suisse (depuis mai 2017, avec le producteur Essento)

## D. PRODUCTEURS ET DISTRIBUTEURS D'INSECTES AUJOURD'HUI EN EUROPE

### 1. Production d'insectes dans l'Union Européenne en général

Avec l'évolution de la législation en Europe et dans certains pays de l'Union, plusieurs sites industriels destinés à la production d'insectes pour l'alimentation animale ou humaine se développent sur le territoire national.

La France n'étant pas dépourvue de producteurs et de commerçants d'insectes, ceux-ci sont organisés, notamment avec la coordination de la FFPIDI. Il s'agit d'une association loi 1901, créée en 2011 et reconnue par la Commission Européenne qui fonctionne comme une Organisation Non Gouvernementale (ONG). Un accompagnement est proposé aux différents acteurs de la filière et elle délivre des agréments sous condition de respect d'une charte et de bonnes pratiques notamment sanitaires (FFPIDI, site internet).

Des entreprises innovantes ont vu le jour au cours des dernières années en France, comme notamment Ynsect (créée en 2011) et Entomofarm (créée en 2014). Ces entreprises produisent des vers de farine (*Tenebrio molitor*) à destination de l'aquaculture et du *pet food* selon deux systèmes distincts :



- Ynsect comprend un site de production depuis 2016 (« Yn-site ») où a lieu la reproduction, l'élevage, l'abattage et la transformation des vers de farine. Par ailleurs, l'entreprise est basée sur un centre de recherche et développement, afin d'améliorer la production et son expansion en Europe (Ynsect, site internet).
- Entomofarm se base sur un système d'élevage collaboratif, sans site d'élevage à proprement parler : la reproduction, l'abattage et la transformation ont lieu sur le site d'Entomofarm, mais l'élevage en lui-même (donc la croissance des larves jusqu'à maturité) a lieu chez des éleveurs. Les bacs contenant les jeunes larves sont livrés aux « Entomofarmers », le plus souvent éleveurs

d'autres animaux par ailleurs et possédant un local permettant d'héberger les vers de farine jusqu'à maturité : l'entreprise les récupèrent alors pour l'abattage et la transformation (Entomo farm, site internet).

L'intérêt ici est de permettre un apport protéique en alimentation animale ayant une origine française (ou européenne) et de limiter ainsi notamment l'importation de soja et de farines de poisson (considérations économiques et écologiques). Le marketing de ces produits est aussi basé sur l'aspect « naturel » d'une alimentation animale basée sur les insectes : les insectes font en effet naturellement partie du régime alimentaire d'un poisson ou d'une poule par exemple.

D'autres entreprises s'inscrivent d'autant mieux dans un contexte de préservation de l'environnement avec le recyclage de déchets organiques par certains insectes. La mouche soldat noire (*Hermetia illucens*) est notamment étudiée et aujourd'hui élevée par plusieurs entreprises en Europe. C'est le cas de NextAlim ou encore de Mutatec, entreprises françaises qui élèvent des larves de mouche soldat noire à partir de déchets végétaux locaux (entre autres fruits et légumes non valorisés) : ils offrent ainsi aux producteurs de biodéchets (industrie agroalimentaire, restauration, grandes surfaces...) une solution de valorisation intéressante. Les larves sont par la suite utilisées en alimentation animale et pour la production de matières fertilisantes (Mutatec, site internet; NextAlim, site internet).



Les entreprises s'intéressant au développement de l'élevage d'insectes en général sont de plus en plus nombreuses en France et ailleurs en Europe, mais leurs productions sont pour l'instant le plus souvent limitées à des utilisations en aquaculture et pour les animaux de compagnie. Des évolutions législatives sont donc attendues, d'une part pour étendre la production à l'alimentation des porcs et des volailles et d'autre part à l'alimentation humaine.

## 2. Production d'insectes comestibles dans l'Union Européenne

Des élevages industriels d'insectes comestibles se sont essentiellement développés dans les pays asiatiques, la Thaïlande et la Chine en particulier (depuis les années 2010). Le plus souvent, la production issue de petits éleveurs est regroupée par de plus grandes entreprises qui transforment et commercialisent alors les insectes (ANSES, 2015). La FAO a mis à disposition des informations sur les techniques d'élevage de différentes espèces d'insectes. Ces élevages industriels sont souvent des centres collecteurs qui récupèrent la production issue de petites fermes d'élevage pour la conditionner industriellement. La production d'insectes comestibles y constitue une activité industrielle reconnue, qui irrigue un marché intérieur fortement demandeur (consommation humaine essentiellement), et se tourne également de plus en plus vers l'exportation (ANSES, 2015).

En Europe, les élevages se développent principalement dans les pays appliquant une politique de tolérance depuis quelques années, donc en Belgique et aux Pays-Bas. Un des plus gros producteurs est l'entreprise « Proti-farm » aux Pays-Bas, avec sa partie élevage pour l'alimentation humaine « Krec-a-food ». En Belgique, on retrouve notamment l'entreprise « Bugoodfood » qui vend des grillons et des vers de farine pour la consommation humaine, produits en Belgique avec certification biologique. Sur le même principe, on trouve en France « Micronutris », producteurs de grillons et de vers de farine biologiques depuis 2011, en partie pour la consommation humaine. Les quelques entreprises françaises qui commercialisent aujourd'hui des insectes sont plutôt basées sur un système d'importation : les produits vendus par Insectéo et Crickeat proviennent d'élevages affiliés à l'entreprise, mais situés en Thaïlande. Les insectes vendus sont alors plus « originaux » (fourmis, vers à soie, scarabées adultes, etc). L'entreprise Jimmini's garantit quant à elle une production européenne d'insectes, sans plus de précisions.

La production d'insectes pour la consommation humaine reste très limitée en Europe, mais se développe depuis quelques années en lien notamment avec l'évolution des législations. Une grande variété d'insectes est disponible en ligne, mais ceux produits en Europe sont le plus souvent des vers de farine, grillons et criquets.

## E. L'ÉLEVAGE D'INSECTES EN PRATIQUE

### 1. Systèmes d'élevage

Il existe des points communs dans l'organisation des élevages d'insectes en Europe mais ils doivent être avant tout adaptés à la biologie des espèces considérées.

#### a. **Organisation générale d'un élevage en lien avec le mode de vie et le cycle de développement**

Le plus souvent, les insectes destinés à l'alimentation sont élevés dans des cuves ou des bacs, construits à partir de matériaux simples. Ces bacs doivent être adaptés au gabarit de l'insecte et à son mode de vie, tout en permettant une surveillance visuelle par l'éleveur : si les vers de farine peuvent être élevés dans un bac peu profond ouvert sur le dessus, ce n'est pas le cas des grillons notamment qui sont élevés dans des bacs plus profonds et recouverts par des « toiles » du type moustiquaires pour empêcher leur passage (ANSES, 2015).



*Figure 16 : Exemple de système d'élevage de vers à soie.  
Les larves se nourrissent au sol puis construisent leur cocon  
entre les branches.  
Source : Ardèche-guide.com.*

L'élevage de vers à soie est un cas particulier car les pupes de cet insecte représentent des sous-produits et non le but principal de cette production : ainsi, les vers ont besoin de branches (ou imitation) en hauteur afin de s'isoler du reste des larves pour former leur cocon de soie, et se transformer en puce en prévision de la métamorphose finale.

Le système d'élevage doit aussi être adapté au cycle de développement de l'insecte, et le plus souvent les différents stades sont séparés : pour les insectes holométaboles (qui présentent une métamorphose complète, les ténébrions par exemple), les individus conservés jusqu'à l'âge adulte sont isolés pour la reproduction. Les larves sont ensuite prélevées pour être élevées séparément jusqu'au stade avant

pupaison (car seules les larves sont consommées). Ce système permet notamment d'éviter le cannibalisme qui peut se produire principalement entre les différents stades. Pour les grillons et criquets, ceux-ci sont consommés à l'âge adulte, et comme pour les vers de farine, la durée d'élevage dépend de l'espèce considérée (ANSES, 2015).

La densité d'insectes dans l'élevage a différents effets qui peuvent être positifs ou négatifs pour l'obtention d'insectes comestibles. Si les ténébrions présentent des comportements d'agglutination et se développent naturellement dans des conditions de forte densité, certaines espèces comme *Zophobas atratus* (ver de farine géant) doivent avoir la possibilité de s'isoler pour former leur pupa, car dans le cas contraire (densité trop élevée), ils ne passeront jamais au stade suivant et finiront par mourir (Kim et al., 2015b). La plupart des insectes élevés ont un comportement naturellement grégaire, donc une densité trop faible aura aussi des effets délétères sur le développement des individus (ANSES, 2015; Barnes and Siva-Jothy, 2000).

Le substrat qui constitue le support d'élevage ne doit pas être abrasif et doit être adapté au mieux au comportement naturel de l'espèce. Par exemple, le ver de farine a besoin d'une certaine épaisseur de substrat pour pouvoir s'enterrer afin de s'éloigner de la lumière notamment (Park et al., 2014). Pour les insectes sauteurs (orthoptères), des installations avec des boîtes d'œufs (par exemple) permettent d'augmenter la surface disponible et d'exprimer leur comportement naturel (Clifford and Woodring, 1990). Pour les vers de farine, le substrat est le plus souvent composé par leur alimentation (son de blé par exemple).

#### **b. Des substrats et des conditions de vie adaptés**

Les insectes sont élevés en intérieur, dans des bâtiments où les paramètres peuvent être fixés et contrôlés : durée et intensité d'éclairage, température et humidité. Certains insectes comme les vers de farine ne nécessitent pas un éclairage important pour être élevés et doivent avoir la possibilité de s'isoler de la lumière (le substrat le permet en général). Dans la plupart des études, c'est le rythme 12 heures de jour / 12 heures de nuit qui est adopté, mais la durée d'éclairage est parfois fixée à 14 heures : l'augmentation de la durée d'éclairage semble diminuer le temps de développement du ver de farine *T. molitor* (Kim et al., 2015c).

La température est un élément dont le contrôle est essentiel pour les animaux poïkilothermes que sont les insectes (animaux à « sang froid »). Pour les insectes habituellement élevés en Europe, la température optimale d'élevage se situe entre

25°C et 30°C. Une augmentation de la température permet en général de diminuer la durée de l'élevage, et d'augmenter la productivité (Adámková et al., 2017; Kim et al., 2015c; Xu et al., 2015). Une étude de 2018 sur deux espèces de vers de farine (*T. molitor* et *A. diaperinus*), a montré que le métabolisme des individus est diminué lorsque la température diminue par rapport à une température optimale, ce qui est corrélé à une diminution de l'efficacité de conversion des ressources alimentaires : cela explique une augmentation de la durée des cycles et donc une productivité diminuée (Bjørge et al., 2018).

Le dernier élément à prendre en compte est l'humidité ambiante. Pour le ver de farine, le grillon domestique et le criquet migrateur, le pourcentage d'humidité est habituellement fixé autour de 70% (ANSES, 2015; Oonincx et al., 2010). Cette humidité élevée nécessite de maintenir une bonne ventilation afin d'éviter notamment le développement de moisissures dans le bac d'élevage. D'après une étude de Clifford et al. en 1990 sur le grillon domestique, les derniers stades de développement de cet insecte seraient plus adaptés à des taux d'humidité plus faibles (50%), alors que les œufs peuvent se développer au-dessus de 90% (Clifford and Woodring, 1990). Ce paramètre est donc à adapter en fonction de l'espèce mais aussi du stade de développement.

### **c. Alimentation et abreuvement**

L'alimentation a un rôle majeur dans le développement des insectes. Pour les espèces habituellement élevées, elle est principalement basée sur des produits céréaliers : son de blé, de maïs, flocons d'avoine, levures de bières, ... Une alimentation pour poulet de chair semble convenable pour des grillons notamment (Clifford and Woodring, 1990). Les vers de farine et orthoptères sont capables de consommer une grande variété d'aliment, ce qui permet de varier leur régime si l'on souhaite recycler des déchets végétaux notamment (fruits et légumes non valorisés, restes de pains) (ANSES, 2015; Van Broekhoven et al., 2015). La question se pose d'une distribution d'aliment à volonté ou non : une telle pratique permet de limiter les interventions humaines et donc le stress et les contaminations, mais dans un même temps entraîne des pertes certaines d'une part des aliments (Adámková et al., 2017; Oonincx and de Boer, 2012). C'est principalement le taux de protéines de cette alimentation qui a une influence sur le développement des insectes : une augmentation

conduit à une accélération du développement et à une diminution de la mortalité chez les vers de farine (Oonincx et al., 2015; Van Broekhoven et al., 2015). Certaines espèces ont traditionnellement une alimentation plus spécifique : le ver à soie (*B. mori*) est classiquement élevé à partir de feuilles de murier, mais cette alimentation a été remplacée dans une étude par de la laitue (*Lactuca sativa*) sans diminution du taux de croissance des chenilles (Yang et al., 2010).

L'eau est soit proposée dans des récipients peu profonds, soit sous forme d'éléments imprégnés et renouvelés : de nombreux élevages de vers de farine utilisent des rondelles de carottes ou encore des feuilles de choux pour un apport d'eau adapté (ANSES, 2015; Miglietta et al., 2015).

L'alimentation est un point clé qui a aussi une influence sur la composition finale des insectes consommés ainsi que sur l'impact écologique de l'élevage de ces insectes (éléments abordés dans un second temps).

## **2. Récolte et abattage**

Les insectes ne sont pas tous récoltés au même stade de développement et au même âge de vie : cela va dépendre de l'espèce. La plupart des insectes sont consommés sous forme de larves ou de pupes (ver de farine, mouche soldat noire, bombyx du murier), mais d'autres sont abattus au stade adulte (orthoptères en général donc grillons, criquets, sauterelles) (van Huis, 2013). La durée de l'élevage est spécifique à une espèce et très dépendante des conditions d'élevage, notamment de la température et de la qualité de l'alimentation (Tableau 3).

Ordre	Espèce ou groupe d'espèces	Stade de récolte	Durée d'élevage (approximative)
Coléoptères	Ténébrion meunier ( <i>T.molitor</i> )	Larve	3 mois <sup>g</sup>
	Ver buffalo ( <i>A.diaperinus</i> )	Larve	40 jours <sup>d</sup>
	Ver de farine géant ( <i>Z.morio</i> )	Larve	4-5 mois <sup>f</sup>
Orthoptère	Grillon domestique ( <i>A. domesticus</i> )	Adulte	2-3 mois <sup>b</sup>
	Grillon tropical ( <i>G. sigillatus</i> )	Adulte	6 semaines <sup>c</sup>
	Criquet migrateur ( <i>L.migratoria</i> )	Adulte	3 mois <sup>a</sup>
Lépidoptères	Bombyx du murier ( <i>B. mori</i> )	Pupe	8 semaines <sup>h</sup>
	Fausse teigne ( <i>G. mellonella</i> )	Larve	20-30 jours <sup>e</sup>

Tableau 3 : Stades de récolte et durée d'élevage des espèces couramment consommées en Europe. D'après Cirad, 2007 <sup>a</sup> ; Clifford & Woodring, 1990 <sup>b</sup> ; DRAFT, 2017 <sup>c</sup> ; Dunford & Kaufman, 2006 <sup>d</sup> ; Francardi et al., 2017 <sup>e</sup> ; Kim et al., 2015 <sup>f</sup> ; Makkar et al., 2014 <sup>g</sup> ; WUR, 2018 <sup>h</sup>.

Une période de jeûne est quasiment toujours respectée avant abattage et dure de quelques heures à quelques jours (24h pour les vers de farine *T. molitor*) : l'intérêt de cette étape est la vidange du tube digestif afin de limiter la concentration en bactéries de l'insecte. On ne connaît pas encore bien l'effet de ce jeûne sur le microbiote des insectes, mais étant donné que le tube digestif n'est pas retiré suite à l'abattage (contrairement aux animaux d'élevage conventionnel), c'est une mesure qui s'est imposée pour limiter le risque sanitaire (ANSES, 2015).

L'abattage se fait ensuite selon trois méthodes distinctes (deux principales) :

- la congélation : cette étape dure au moins 24h à -18°C. L'avantage est que les protéines sont peu dénaturées, donc la composition nutritionnelle est peu modifiée. Cependant, ces basses températures n'assurent à priori pas la décontamination microbiologique, ni la décontamination parasitaire : les insectes subissent donc d'autres traitements avant commercialisation (ANSES, 2015). Un autre avantage est que le passage à des températures faibles assure l'« endormissement » des larves avant qu'elles ne meurent et donc préviendrait une éventuelle souffrance (Pali-Schöll et al., 2018) ;

- l'ébouillantage : cette étape dure de 1 à 5 minutes dans l'eau bouillante. L'avantage est que dans ce cas les insectes sont cuits et on assure une décontamination avec une pasteurisation très efficace (destruction de la flore végétative et des parasites, mais pas des formes sporulées des bactéries). Cependant, une partie des nutriments peut être dégradée par la cuisson, réduisant ainsi leur intérêt nutritionnel. Les insectes abattus de cette manière doivent immédiatement être transformés ou au minimum congelés en attendant leur transformation car ils ne se conservent pas de cette manière (ANSES, 2015). Selon cette méthode, les insectes sont cuits vivants, le contact avec l'eau chaude est bref avant la mort, mais cette méthode peut être discutée du point de vue éthique ;
- l'étuvage : méthode décrite pour l'entreprise française Ynsect, il s'agit d'un traitement par la chaleur avec utilisation de vapeur d'eau, ce qui reste à priori favorable à la destruction des microorganismes. Peu d'informations sont disponibles au sujet de cette méthode d'abattage (Ynsect, site internet).

L'abattage peut avoir lieu sur le même site que l'élevage car il ne nécessite pas d'aménagement de grande ampleur, mais il peut être aussi rassemblé en un lieu dédié pour des insectes provenant d'élevages extérieurs (Entomo farm, site internet). Des questions d'ordre éthique doivent se poser sur la question de l'abattage, mais peu d'études se sont jusqu'alors intéressées à ce sujet (Pali-Schöll et al., 2018).

### **3. Santé des insectes d'élevage**

#### **a. *Entomopathogènes connus***

Plusieurs types d'entomopathogènes sont connus en élevage, des virus, des bactéries, des champignons et des protozoaires peuvent déclencher des maladies dans les élevages d'insectes.

Seules 5 familles de virus sont spécifiquement entomopathogènes : les Ascoviridae, Baculoviridae, Polydnviridae, Discistroviridae et Iflaviridae. Parmi les virus incriminés, on trouve les baculovirus qui vont s'exprimer chez l'insecte par un comportement léthargique, un gonflement du corps et un changement de couleur :

cette infection aboutit à une liquéfaction de l'individu avec libération des particules virales qui contaminent d'autres insectes par voie orale. D'autres virus vont causer des anomalies de développement, comme des ailes déformées avec les iflavirus (Eilenberg et al., 2015). Le densovirus du grillon domestique (*A. domesticus*) représente depuis plusieurs années une grosse difficulté pour les élevages produisant cette espèce car celui-ci provoque une mortalité qui peut aller jusqu'à 100% pour un élevage. Les grillons arrêtent de se nourrir, se déplacent peu, la mue est impossible et ils finissent par mourir de septicémie. Pour se débarrasser de ce pathogène, c'est le renouvellement complet de l'élevage qui doit être envisagé, voire un changement d'espèce (remplacer par *Gryllodes sigillatus* ou *Gryllus bimaculatus*) bien que le densovirus semble pouvoir toucher aussi d'autres grillons (Maciel-Vergara and Ros, 2017). Les mécanismes de transmission, et notamment la transmission verticale ne sont pas encore bien connus.



Figure 17 : Abeilles infectées par un iflavirus présentant un développement anormal des ailes.  
Source : Eilenberg et al., 2015

On trouve des bactéries entomopathogènes au sein de différents genres bactériens : les *Bacillus*, *Serratia*, *Pseudomonas*, *Paenebacillus*, *Micrococcus* et *Xenorhabdus* principalement. Le plus souvent, les maladies bactériennes sont associées au stade larvaire de l'insecte (qui se contamine par voie orale) et conduisent à des septicémies entraînant un changement de couleur de l'individu infecté (devient noirâtre). Les genres *Serratia* et *Proteus* sont les plus souvent mis en cause dans ce genre de manifestation clinique. La bactérie la plus étudiée est *Bacillus Thuringiensis*, pouvant être apportée notamment par l'alimentation ou le substrat d'élevage. Elle a la capacité de former des spores bactériennes (forme de résistance) ce qui la rend difficilement destructible et pose des problèmes dans certains élevages de lépidoptères (vers à soie notamment). Un environnement stressant peut être le facteur déclenchant d'une infection par des bactéries du genre *Pseudomonas* (Eilenberg et al., 2015).



Figure 18 : Deux exemples de mortalité larvaire chez le ver de farine.  
A gauche, larve de *T. molitor* infectée par une bactérie (espèce non identifiée). A droite, larve de *T. molitor* infectée par le champignon *Beauveria bassiana*.  
Source : (Eilenberg et al., 2015).

Il existe trois groupes majeurs de champignons entomopathogènes : les *Hypocreales*, les *Entomophthoromycota* et les *Ascosphaera*. La plupart du temps, l'infection mycosique a lieu à travers le tégument et rarement par voie orale. Parmi les Hypocréales, on trouve des champignons qui infectent les vers de farine du genre *Zophobas* (principalement élevés pour l'alimentation animale) par ailleurs vus comme des espèces résistantes aux pathogènes. *Metarhizium brunneum* est un champignon capable d'infecter un grand nombre d'espèces au sein des coléoptères, des hémiptères et des lépidoptères. Une technique de défense contre certaines infections fongiques a été observée chez plusieurs espèces d'insectes : la « fièvre comportementale » consiste pour l'insecte infecté à se déplacer vers une zone où la température est plus élevée ce qui est létal pour le champignon et non pour l'insecte. Les Entomophtorales sont eux à l'origine d'épidémies au sein d'un élevage et sont très spécifiques d'une espèce (Eilenberg et al., 2015).

On trouve aussi des protozoaires et des microsporidies qui sont à l'origine d'infections le plus souvent latentes, donc pas toujours identifiables et qui vont favoriser l'apparition d'autres maladies. *Paranosema locusta* est une espèce de microsporidie bien connue chez le criquet migrateur qui adopte souvent une forme chronique avec diminution des performances d'élevage, mais qui peut aussi entraîner de la mortalité (Eilenberg et al., 2015).

Les nématodes ne sont pas des microorganismes, mais des parasites des insectes. Des espèces appartenant aux genres *Steinernema* et *Heterorhabditis* sont à l'origine d'infections chez plusieurs espèces : le tube digestif est infecté par la forme larvaire (stade 3) qui libère des bactéries symbiotiques qui elles-mêmes produisent des toxines létales pour l'insecte. La suite du développement a alors lieu grâce aux ressources que constitue le cadavre de l'insecte, et de nouvelles larves peuvent

infecter d'autres individus. Ces parasites sont peu spécifiques en général, et ils se développent dans des conditions d'humidité importante, supérieures à celles appliquées habituellement en élevage d'insectes (Eilenberg et al., 2015).

***b. Prévention des maladies et interventions de l'éleveur face aux pathologies en élevage***

Le premier élément pour repérer le développement d'une quelconque maladie est l'observation : baisse d'activité, croissance faible, mortalité importante sont des indices à prendre en compte. Le prélèvement systématique des individus mourants ou morts permet d'effectuer sur eux différentes observations et analyses qui permettront de comprendre le processus en cours et d'éviter qu'il se généralise au lot voire à l'élevage (observation macroscopique, microscopique, analyse PCR).

Un nettoyage adapté est aussi important : un simple lavage suivi d'une désinfection suffit en général à se débarrasser des microorganismes, mais il est parfois nécessaire d'utiliser la stérilisation par ultraviolets ou bien de se débarrasser définitivement d'une cage contaminée.

Étant donné le potentiel de latence de certains virus notamment, il est déconseillé de rassembler des lots après l'identification d'une infection car certains individus peuvent être contaminés sans pour autant exprimer les symptômes de la maladie : ils pourront alors être à l'origine de la contamination du lot dans lequel ils sont introduits.

Pour une meilleure résistance des insectes aux maladies, il est intéressant de garder une certaine variabilité génétique dans l'élevage, ce qui implique d'introduire régulièrement de nouveaux individus pour la reproduction. Cela pose le problème d'une introduction éventuelle de nouveaux pathogènes dans l'élevage : il est important de respecter une quarantaine pour ces nouveaux individus, de préférence sur plusieurs générations (au moins deux) afin d'observer l'apparition d'éventuels symptômes au cours de leur développement. Des croisements entre lignées peuvent être pratiqués dans le but d'augmenter la résistance aux pathogènes, mais un nombre minimal d'individus reproducteurs doit être respecté pour chaque nouvelle lignée pour éviter un appauvrissement génétique de l'élevage (Eilenberg et al., 2015).

### c. **Perspectives en matière de résistance aux pathogènes**

La sélection de lignées plus résistantes est l'une des hypothèses d'avancée importante dans ce domaine. Chez certains insectes, notamment des lépidoptères (papillons) et le coléoptère *T. molitor*, la couleur de la cuticule est un caractère héritable qu'il est donc possible de sélectionner par la reproduction (Barnes and Siva-Jothy, 2000). Or, la couleur de la cuticule semble avoir une influence sur la résistance aux maladies : les insectes plus foncés en couleur sont plus résistants que les insectes plus clairs (Barnes and Siva-Jothy, 2000; Lee et al., 2008). Lors de la pénétration d'un hyphe de champignon pathogène à travers la cuticule, cet élément subit une mélanisation et lorsqu'il atteint l'hémolymphe, il y a libération de l'enzyme phénoloxidase (PO) (Barnes and Siva-Jothy, 2000). En 2017, Evison et al. ont montré que chez le ver de farine *T. molitor*, une cuticule plus foncée (donc plus mélanisée) est corrélée à une épaisseur plus importante ainsi qu'à une porosité moindre de celle-ci ce qui explique au moins en partie la plus grande résistance observée pour les lignées foncées (Evison et al., 2017). Tous les mécanismes de résistance des insectes ne sont pas à ce jour élucidés, mais certains facteurs ont une influence sur l'immunité et la couleur des insectes étudiés :

- l'alimentation : l'apport en protéine doit être suffisant en quantité et en qualité pour permettre une mélanisation suffisante et une bonne immunité (Lee et al., 2008). L'ajout de tyrosine dans l'alimentation du ver de farine permet une mélanisation plus importante, donc constitue peut-être une piste pour l'augmentation de la résistance aux pathogènes (Evison et al., 2017) ;
- la densité d'élevage : *T. molitor* adulte est plus foncé s'il a été élevé en groupe plutôt qu'isolé de ses congénères, et les individus sont aussi plus lourds et se développent plus vite. Une couleur plus foncée étant liée à une résistance plus grande, on interprète ce phénomène comme un mécanisme d'adaptation aux risques engendrés par la promiscuité (transmission de maladie, cannibalisme) (Barnes and Siva-Jothy, 2000).

Ainsi, une sélection sur la couleur tout en maintenant une alimentation et une densité adéquate semble constituer une piste intéressante pour une bonne immunité en élevage de vers de farine.

D'après plusieurs études, il existerait une immunité spécifique chez l'insecte, analogue de l'immunité adaptative observée chez les vertébrés, mais dont les mécanismes ne sont pas bien connus à ce jour et certainement dépendants de multiples facteurs : espèce considérée, pathogène mis en cause, conditions de vie, stade de développement, etc. L'existence d'un tel phénomène laisse envisager la possibilité de création de « vaccins » dirigés contre certains pathogènes présents en élevage lorsque le phénomène sera bien compris (Contreras-Garduño et al., 2016).

## **F. TRANSFORMATION DES INSECTES ET PRODUITS DISPONIBLES SUR LE MARCHÉ EUROPÉEN**

### **1. Transformation et techniques de conservation des insectes et produits à base d'insectes**

Il est important que le processus de transformation subi par les insectes permette d'assurer leur décontamination. Pour une meilleure conservation, la plupart des insectes proposés en alimentation humaine sont vendus déshydratés.

Aujourd'hui, on peut utiliser les techniques de déshydratation suivantes (ANSES, 2015):

- la déshydratation en four sec ventilé à basse température (60 à 110°C, mais en général 90°C) qui permet une bonne pasteurisation même pour les produits congelés et jamais cuits (abattage par congélation) ;
- la friture (plus rarement employée) où les insectes sont frits dans l'huile bouillante à plus de 160°C. La décontamination est plus forte, et cela permet la dénaturation de certaines protéines de venins notamment (cuisson traditionnelle de certaines araignées/scorpions par exemple). Cependant, l'effet délétère est la possible néoformation de protéines potentiellement nocives (peu étudiée) ;
- le toastage c'est-à-dire le séchage à des températures supérieures à 100°C, 120°C en général. C'est une étape qui peut avoir lieu en fin de cycle de séchage afin de développer des arômes spécifiques et d'améliorer la texture (croustillant recherché pour les produits vendus pour l'apéritif). Les traitements au-dessus

de 100°C mais en absence d'humidité ne détruisent que partiellement les spores bactériennes : on obtient donc des produits pasteurisés qui peuvent encore contenir des formes sporulées.

Un seuil de séchage suffisant doit être atteint pour permettre une bonne conservation du produit, donc inhiber les bactéries présentes et éviter le développement de moisissures avec une activité de l'eau ( $a_w$ ) inférieure à 0.

D'autres méthodes de transformation sont envisagées :

- la lyophilisation : il s'agit d'une déshydratation à basse température, la majeure partie de l'eau est extraite par sublimation (passe directement de l'état solide à l'état gazeux). Cette méthode n'est pas considérée comme une pratique assainissante, donc ne peut être envisagée que pour des insectes ayant préalablement suivi une étape de cuisson (notamment insectes abattus par ébouillantage) ;
- l'acidification : des chercheurs ont montré que la fermentation lactique permettrait dans certaines conditions une diminution importante des entérobactéries dans la transformation du ver de farine *T. molitor* (Klunder et al., 2012).

Comme tout produit sec, les insectes déshydratés se conservent à température ambiante dans un emballage hermétique. Leur contenance en acide gras insaturés est un facteur limitant leur conservation qui entraîne une sensibilité plus grande au phénomène de peroxydation due à l'oxygène sous l'effet de la chaleur et de la lumière (rancissement). La structure de l'aliment final à base d'insectes favorise ce rancissement car il s'agit de petites particules plus ou moins poreuses. Un conditionnement sous vide est parfois effectué, voire une congélation secondaire qui permettent une conservation sur le long terme (ANSES, 2015).

Pour obtenir des farines d'insectes, ceux-ci sont broyés suite aux divers procédés de cuisson, de manière plus ou moins fine, avec utilisation de tamis ou non. Elles peuvent être vendues comme telles ou bien intégrées à d'autres produits (pains, biscuits,...). Certaines substances peuvent être extraites à partir des insectes pour divers usages : il s'agit notamment de certaines protéines, d'huiles et de chitine.

## 2. Produits actuellement disponibles sur le marché européen

### a. *Produits hors alimentation humaine*

Avant d'être commercialisés pour l'alimentation humaine, les insectes sont d'abord utilisés en alimentation animale et plus largement dans le domaine agricole. En France il s'agit presque exclusivement de vers de farine *T. molitor* et de mouche soldat noire *H. illucens*, mais d'autres espèces comme des grillons et d'autres espèces de vers de farine sont disponibles.

Différents produits sont actuellement commercialisés en France et en Europe :

- des insectes vivants sont commercialisés pour l'alimentation des reptiles de compagnie ou de zoo et ne subissent donc aucune transformation avant leur commercialisation. On les trouve principalement en animalerie ou directement auprès des élevages ;
- les farines d'insectes sont utilisées en alimentation pour l'apport en protéines dans les rations d'animaux d'élevage, avec l'objectif de limiter l'utilisation de farines de poisson et de soja. En France, cette utilisation n'est actuellement autorisée qu'en aquaculture et pour l'alimentation des animaux de compagnie. La commercialisation se fait principalement par le biais des sites internet des fabricants ;
- les huiles d'insectes sont vendues pour leur richesse en acides gras polyinsaturés et leur apport intéressant dans l'alimentation des poissons d'élevage principalement. La vente se fait aussi par internet auprès des producteurs ;
- toujours dans le domaine agricole, des préparations à base d'excréments des insectes élevés sont revendues comme fertilisants pour les sols et sont utilisables notamment en agriculture biologique ;
- enfin, certains extraits comme la chitine, certaines huiles et certaines protéines entrent dans la composition de produits biosourcés (biocarburants et certains cosmétiques notamment).

Les producteurs d'insectes trouvent donc des débouchés assez importants dans le secteur de l'alimentation mais aussi dans d'autres domaines qui permettent de valoriser des sous-produits de l'élevage (déjections notamment). La limite actuelle concerne les élevages de porcs et de volailles, pour lesquels il est interdit d'utiliser les farines d'insectes en France et en Europe.

### **b. Produits destinés à l'alimentation humaine**

En alimentation humaine, les insectes sont disponibles sous deux formes (ANSES, 2015) :

- entiers et déshydratés ;
- sous forme de farine à intégrer ou déjà intégrée à un produit transformé.

Les insectes entiers commercialisés en Europe sont principalement associés à l'apéritif. En effet, ils sont le plus souvent déshydratés et aromatisés avec des saveurs associées à l'apéritif (barbecue, fines herbes, oignons,...) qui leur permettent de s'intégrer comme nouveauté pour certains consommateurs (Caparros Megido et al., 2014a). Ils sont disponibles sur internet principalement, mais aussi dans certains commerces et même certains bars et restaurants qui en proposent (c'est le cas également en France malgré la législation). Il existe aussi des restaurants proposant des plats confectionnés à partir d'insectes frais, même si cela est plus rare.



Figure 19 : Insectes vendus pour l'apéritif (Jimini's).  
Source : natureetdecouvertes.com

Les débouchés pour cette filière semblent plus importants pour les farines d'insectes, car celles-ci peuvent être facilement intégrées dans des produits d'usage courant, sans nécessairement en affecter les caractéristiques organoleptiques. Il s'agit habituellement de produits à base de farine végétale qui peut être remplacée partiellement par de la farine d'insectes (pains, biscuits, pâtes, pâtisseries).

Cependant, l'apport en protéines de ce produit le fait aussi envisager comme substitut à la viande, et certains fabricants s'essayent notamment à la confection de « steaks d'insectes » à intégrer à des hamburgers notamment (Terrien, 2018). Ces produits sont disponibles aussi sur internet et dans certains pays dans les restaurants et commerces.



Figure 20 : Pain à base de farine d'insectes commercialisé en Finlande.  
Source : Fazer.com

Actuellement, les produits à base d'insectes sont consommés par une très faible part de la population en Europe, d'une part parce qu'ils sont peu produits (en lien avec une législation limitative), mais aussi parce que l'acceptation de l'entomophagie par les consommateurs occidentaux reste très limitée.

## G. PROJETS DE RECHERCHE EN COURS

Dans ce contexte d'engouement de certaines institutions internationales et des industriels, des projets de recherche français et communautaires ont vu le jour pour améliorer les connaissances scientifiques dans ce domaine.

Le projet DESIRABLE, soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) vise à développer une raffinerie de bioconversion par les insectes à partir de coproduits sous-valorisés en protéines adaptées à l'alimentation animale. Il a été lancé en 2013 pour une durée de 48 mois. Plusieurs partenaires publics (cinq laboratoires INRA, CNRS, CEA, ITAP) et privés (Ynsect, IPV Foods) participent à ce projet. L'Anses, aux côtés d'autres institutions publiques, pôles de compétence, organisations de consommateurs et représentants des filières, est membre du comité consultatif de ce projet financé par l'ANR. Deux espèces d'insectes ont été sélectionnées : le ver de farine, *Tenebrio molitor* et la mouche soldat *Hermetia illucens*. Ce projet intègre une

étude sociale et environnementale, ainsi qu'une analyse des risques et des intérêts nutritifs (ANSES, 2015; DESIRABLE, site internet).

Le projet PROteINSECT – FERA (Food and Environment Research Agency) s'intéresse à l'exploitation des insectes comme alternative durable à l'approvisionnement en protéines pour l'alimentation animale et la nutrition humaine. C'est un projet sur trois ans financé par la Commission Européenne qui repose sur un consortium international avec des partenaires publics et privés en Europe, Afrique et Asie. Deux espèces de mouches sont étudiées, la mouche soldat noire et la mouche domestique, et leurs larves utilisées en production pour valoriser des déchets organiques en matière fertilisante. Les différents extraits de ces insectes peuvent être utilisés dans plusieurs domaines : la chitine de l'exosquelette pour ses propriétés antimicrobiennes et les lipides pour la production de biodiesels. D'autres questions sont abordées, comme les aspects relatifs à la production industrielle, à l'intérêt de telles ressources en alimentation animale et à la qualité et à la sécurité alimentaire résultant d'une alimentation à base d'insectes. L'analyse du cycle de vie est aussi évaluée, essentiellement par rapport aux impacts environnementaux (ANSES, 2015).

Des scientifiques de l'Université de Wageningen aux Pays-Bas s'intéressent tout particulièrement aux possibilités qu'offre le développement de l'élevage d'insectes en Europe et à travers le monde dans le contexte actuel. Le chercheur Arnold Van Huis (directeur du département d'entomologie de l'université de Wageningen) et ses collègues sont à l'origine de nombreuses publications sur le sujet depuis une dizaine d'années (van Huis, 2013, 2016; Oonincx et al., 2015).

La plupart des entreprises qui produisent des insectes en Europe ont une part de leur activité concentrée sur la recherche et étudient eux-mêmes leurs modes de production et les manières de les améliorer. Cependant, ces recherches restent le plus souvent internes aux entreprises, dans une problématique de protection contre la concurrence et il est même impossible pour des chercheurs extérieurs de connaître en particulier la composition précise de l'alimentation des insectes produits (Oonincx and de Boer, 2012).

Des recherches sont aussi menées sur des continents où la consommation d'insectes est présente de manière traditionnelle, notamment en Asie (Thaïlande et Chine) et en Amérique centrale (Mexique). Le passage d'un système de récolte à un système d'élevage est en cours notamment en Asie.

---

Il existe une grande diversité d'insectes consommés à travers le monde par le biais de récolte, mais seules certaines espèces sont actuellement envisagées pour l'élevage. Celui-ci est aujourd'hui peu développé en Europe en ce qui concerne l'alimentation humaine, en lien notamment avec une législation peu permissive. Cependant, une réelle dynamique existe dans la filière insectes, avec de nombreux types de productions et débouchés notamment en alimentation animale, et l'évolution récente de la législation européenne laisse penser qu'une expansion est possible. La recherche s'intéresse de plus en plus à ces animaux qui représentent une source de nutriments intéressante pour l'homme et dont certains aspects de la physiologie permettent de les envisager comme candidats performants pour produire une part de notre alimentation.

## **PARTIE II : APPORTS DE L'ENTOMOPHAGIE FACE AUX ENJEUX ACTUELS**

### **A. ENJEUX ÉCOLOGIQUES ACTUELS ET PRODUCTION D'INSECTES**

Aujourd'hui, l'impact des activités humaines sur l'environnement est déjà considérable, mais va nécessairement augmenter d'ici 2050 étant données les prévisions pour la croissance de la population planétaire. Cette population grandissante est à l'origine d'une augmentation des besoins en protéines et donc notamment en protéines d'origine animale. Ce point est problématique car les impacts de l'élevage sur l'environnement sont multiples et déjà importants. L'un des plus couramment cité est l'émission de gaz à effet de serre contribuant au réchauffement climatique, les activités liées à l'élevage représentant 14,5% de ces émissions (FAO, 2016). L'utilisation des terres arables pour produire l'alimentation des animaux d'élevage ainsi que la consommation d'eau notamment pour les cultures sont d'autres aspects de l'impact de l'élevage sur l'environnement. L'utilisation de pesticides sur les terres cultivées et l'excrétion d'azote importante par les animaux eux-mêmes participent aussi à la pollution de l'environnement (FAO, 2006).

Trouver des alternatives à notre système actuel de productions animales semble donc nécessaire dans un cadre d'augmentation de la demande. Il existe des protéines d'origine végétale qui présentent des intérêts nutritionnels certains (principalement le soja), mais un autre type de protéine pourrait être utilisé dans les décennies à venir : les protéines issues d'insectes. L'élevage d'insectes présente un premier avantage par rapport à une récolte de ces animaux dans le milieu naturel, qui peut être une menace pour la biodiversité dans certains cas. On peut se demander si le développement de l'élevage d'insectes à grande échelle présente un intérêt du point de vue de l'impact écologique par rapport à des systèmes conventionnels.

#### **1. Productivité des insectes et perspectives en termes d'alimentation**

L'un des facteurs limitant pour qu'un élevage quel qu'il soit puisse être durable est l'alimentation des animaux de cet élevage. Chaque élément de cette alimentation doit être considéré afin de limiter son impact sur l'environnement :

- utilisation de pesticides dans les cultures,
- utilisation d'eau dans les cultures,
- émissions de gaz à effet de serre par les machines agricoles et les transporteurs et utilisation de ressources fossiles.

En suivant ces principes, une alimentation idéale serait issue d'une agriculture limitant les pesticides, ne nécessitant pas l'utilisation d'une quantité d'eau trop importante pour produire et se trouvant à proximité de l'élevage qui l'utilise.

Dans un contexte où il faudrait à terme nourrir convenablement une population grandissante, la répartition des ressources de la planète entre êtres humains et animaux d'élevage est un facteur important. En effet, actuellement la part des terres cultivables réservées à l'alimentation des animaux d'élevage est majeure et constitue donc un facteur limitant pour les autres ressources alimentaires de la planète utilisables directement par l'homme. Pour obtenir un élevage d'insectes dit durable, il s'agit d'une part de limiter l'utilisation des terres et d'autre part celle des ressources pouvant être aussi utilisées en alimentation humaine (Lundy and Parrella, 2015).

Une seconde avancée serait d'utiliser des produits non consommés actuellement par les animaux d'élevage conventionnels. Sur ce point, certains insectes ont montré leurs capacités naturelles à se reproduire à partir de déchets organiques divers. On pense notamment aux diptères (mouches en général) qui pullulent très rapidement à partir de ressources alimentaires basées sur nos déchets alimentaires quotidiens. L'intérêt est double ici puisque ces déchets sont eux-mêmes habituellement à l'origine d'émission de gaz à effet de serre et de pollution des sols, l'impact sur l'environnement est alors doublement limité (Lundy and Parrella, 2015).

#### ***a. Efficacité de conversion et bases de l'alimentation actuelle des insectes***

Actuellement, les insectes sont élevés principalement pour nourrir les animaux, au départ seulement des espèces non destinées à la consommation humaine (par exemple les reptiles ou oiseaux de compagnie). Depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2017, le règlement européen (CE 2017/893) permet leur utilisation pour certains animaux d'élevage destinés à la consommation humaine (aquaculture uniquement) et pour les carnivores domestiques (chien, chat) (Commission Européenne, 2017).

L'alimentation du ver de farine (le plus couramment utilisé actuellement en Europe et plus traditionnellement en Chine ) est basée sur un mélange de céréales additionné de protéines d'origine diverses (souvent des levures) et d'éléments végétaux pour l'apport en eau (Makkar et al., 2014). Cette alimentation est globalement proche de celle utilisée pour élever des poulets de chair.

i. Indice de consommation

Avant d'envisager des ressources alimentaires différentes, il convient de se poser d'abord une question simple : peut-on produire plus d'insectes (en poids) que d'autres animaux avec la même quantité de ressources alimentaires initiales ? Si c'est le cas, remplacer une partie de la production actuelle par une production d'insectes présenterait un avantage certain.

Pour mesurer la capacité de « conversion » d'un organisme d'une denrée alimentaire en denrée comestible, on évalue sa faculté à prendre 1 kg en consommant une certaine quantité de matière organique, ce qui peut s'exprimer de la façon suivante (Van Broekhoven et al., 2015) :

$$\text{IC (Indice de Consommation)} = \frac{\text{Nourriture consommée (kg)}}{\text{Gain de poids (kg)}}$$

Ainsi, la comparaison des indices de consommation pour les animaux d'élevage conventionnel, donne les résultats suivants (Wilkinson, 2011) :

- Bœuf : IC = 8,8
- Porc : IC = 4
- Poulet : IC = 2,3

En comparaison, les résultats trouvés chez les insectes pour un régime alimentaire conventionnel (principalement issu de céréales), sont proches de ceux obtenus pour des poulets de chair, compris entre 2 et 3 pour le ver de farine *Tenebrio molitor* (Oonincx and de Boer, 2012; Van Broekhoven et al., 2015) et de 0,9 à 1,3 pour le grillon domestique *Acheta domesticus* (Lundy and Parrella, 2015; Nakagaki and Defoliart, 1991) .

Un autre paramètre reste cependant à prendre en compte : le pourcentage de l'animal qui peut être consommé. En effet, pour le cas de l'insecte on consomme le

plus souvent celui-ci en entier, ce qui n'est pas le cas des autres animaux d'élevage. En effet, on retrouve approximativement les valeurs suivantes (van Huis, 2013):

- Bœuf : 40%
- Porc charcutier : 55%
- Poulet de chair : 55%

Il y a donc une part non négligeable de leur poids pour laquelle ces animaux dépensent de l'énergie mais qui ne sera pas consommée après abattage (squelette et plumes notamment), point sur lequel les insectes sont donc avantageux car consommables à 100% (plutôt 80% pour certains orthoptères notamment) (van Huis, 2013). Les parties non consommées des animaux peuvent toutefois être valorisées suite à l'abattage (cuirs, tissu conjonctif,...).

## ii. Efficacité de conversion des protéines ou « Protein Conversion Efficiency »

Si nous nous intéressons actuellement aux insectes, c'est principalement pour leur capacité à fournir des protéines animales. Les chercheurs s'intéressent donc plus précisément à leur capacité à produire ces molécules à partir d'un aliment donné, calculant ainsi leur efficacité de conversion en protéines (PCE) (Lundy and Parrella, 2015):

$$PCE = \frac{\text{Quantité de protéines produite}}{\text{Quantité de protéines consommée}}$$

Les valeurs données par Lundy et al. en 2015 pour les animaux d'élevage conventionnel sont les suivantes :

- Poulet : PCE = 25-33%
- Porc : PCE = 13%
- Bovin : PCE = 5%

Dans cette même étude, la valeur trouvée pour le grillon domestique (*Acheta domesticus*) pour un régime alimentaire conventionnel est de 35%, ce qui est supérieur aux valeurs trouvées pour les autres espèces (Lundy and Parrella, 2015). D'autres indices de conversion ont aussi montré une efficacité de conversion des protéines supérieure pour le grillon et le ver de farine par rapport aux espèces conventionnelles (Oonincx et al., 2015).

Ainsi, même si cela réclame d'autres études et doit être précisé selon les espèces d'insectes, ces animaux présentent un réel avantage en termes d'efficacité de conversion de protéines par rapport aux animaux d'élevage conventionnel.

### ***b. Perspectives en matière de réutilisation des déchets***

Un autre insecte pouvant être utilisé en alimentation animale (alimentation humaine non envisagée pour l'instant) est la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*). Celle-ci pourrait être élevée à partir de fumier de porc ou de volaille, mais aussi de déchets issus de l'alimentation humaine, ce qui permet de convertir des éléments à l'origine de pollutions diverses en une source de protéines très intéressante (Makkar et al., 2014).

Plusieurs chercheurs se sont donc penchés sur les possibilités d'étendre cette capacité de conversion des déchets à d'autres insectes plus classiquement envisagés en alimentation humaine (ténébrions et orthoptères principalement) qui présentent pour la plupart une part d'activité saprophyte.

Différents types d'alimentation constitués de déchets et de sous-produits divers ont été testés et comparés à une alimentation traditionnelle :

- restes de pain, de gâteaux industriels (Collavo et al., 2005; Oonincx et al., 2015; Van Broekhoven et al., 2015)
- paille fermentée (Li et al., 2013)
- déchets d'épicerie (Collavo et al., 2005; Lundy and Parrella, 2015)
- restes de nourriture divers (Collavo et al., 2005; Lundy and Parrella, 2015) ;
- fumier issu d'élevage de poules (Lundy and Parrella, 2015)
- épiluchures de pomme de terre (Oonincx et al., 2015)

Ainsi, un certain nombre de possibilités ont été étudiées pour faire évoluer l'alimentation de ces animaux et ouvrir des perspectives en matière de réutilisation des déchets. Dans les études d'Oonincx et Van Broekhoven en 2015, le principe est l'obtention de différents types d'alimentation constitués à partir des éléments décrits précédemment, qui diffèrent par leur contenu en protéines et lipides pour une étude et en protéines et en amidon pour l'autre étude (Oonincx et al., 2015; Van Broekhoven et al., 2015). Quelles que soient les recherches sur le sujet, les teneurs élevées en protéines sont obtenues sur la base d'ajout de levures (de bière le plus souvent). Les

comparaisons se font le plus souvent avec l'alimentation de poulet de chair ou de vaches laitières (constituées en grande partie de céréales).

i. Impact de l'alimentation sur le développement et la survie des insectes

Une alimentation non adaptée peut avoir des effets délétères sur le développement général des animaux et cela quelle que soit l'espèce considérée. Différents éléments du développement ont donc été pris en compte et évalués en fonction des différents régimes conçus à partir de « déchets ».

Globalement, une alimentation pauvre en protéines (environ 12%), qu'elle soit plus ou moins riche en lipides ou en glucides, sera délétère pour le développement des insectes étudiés (vers de farine et grillon domestique) : le développement est ralenti avec augmentation de la durée de chaque stade et la mortalité est augmentée avec un certain nombre d'individus qui n'atteignent pas leur stade de récolte (Oonincx et al., 2015; Van Broekhoven et al., 2015). Au contraire, une richesse en protéines par rapport à une alimentation conventionnelle (environ 35% au lieu de 17%), aura un effet positif en raccourcissant le temps de développement chez deux espèces de vers de farine, *Tenebrio molitor* et *Zophobas atratus* (Van Broekhoven et al., 2015). Un biais existe peut-être dans ces expériences étant donné le fait que les levures de bières utilisées pour l'apport de protéines apportent de la vitamine B connue pour stimuler la prise alimentaire chez *Tenebrio molitor* (Van Broekhoven et al., 2015). Le stade de pupaison est aussi affecté par la qualité de l'aliment : en effet, si chez le ver de farine la durée de la pupa n'est pas affectée par la composition de l'aliment, son poids et sa solidité sont diminués avec un régime pauvre en protéines pour trois espèces (Van Broekhoven et al., 2015).

La mortalité est très augmentée pour les régimes pauvres en protéines, mais cela pourrait être dû à la présence en grande quantité de restes de biscuits industriels contenant notamment de la cannelle et du clou de girofle, dont les vapeurs peuvent être toxiques chez les insectes (Van Broekhoven et al., 2015). Cela attire notre attention sur le fait qu'une alimentation issue de déchets quels qu'ils soient peut être à l'origine d'effets très délétères sur la survie et le développement des insectes et que leur qualité doit être étudiée précisément avant leur intégration généralisée dans l'alimentation des insectes.

Les insectes comestibles ne semblent donc pas avoir de difficultés majeures à se développer à partir de déchets organiques, ceux-ci ne nécessitant pas de traitement particulier au préalable. Ceci est un avantage notable par exemple face aux microalgues hétérotrophes (envisagées comme sources de protéines en alimentation animale) qui nécessitent un substrat liquide et des conditions stériles pour un développement optimal (Pleissner and Rumpold, 2018).

## ii. Impact de l'alimentation sur la production de gaz à effet de serre

Concernant l'émission de gaz à effet de serre et la pollution des sols, l'utilisation de matière organique non consommée habituellement permet déjà une limitation des rejets que celle-ci aurait entraînés en temps normal (Lundy and Parrella, 2015). Cet effet est bénéfique et il est augmenté également par le fait que la récupération des déchets est souvent associée à un système de réutilisation locale, donc avec une limitation du transport de l'alimentation jusqu'au lieu d'élevage.

En 2010, l'étude de Oonincx compare ses résultats concernant la production de CO<sub>2</sub> de 5 insectes avec ceux d'autres chercheurs en 2002 : dans l'ancienne étude, les 9 vers de farine considérés ne sont pas nourris le temps de l'étude et émettent moins de CO<sub>2</sub> que ceux de l'étude plus récente, ce qui met en avant le fait que le rejet de CO<sub>2</sub> va entre autres dépendre du processus d'alimentation (Duncan et al., 2002; Oonincx et al., 2010). Moins nourrir les animaux est cependant délétère pour leur croissance donc non envisageable, mais la nourriture est elle-même à l'origine de production de CO<sub>2</sub> : il paraît intéressant de la donner par petites quantités régulières correspondant aux besoins des animaux plutôt que de la laisser à volonté avec une proportion non consommée et productrice de gaz à effet de serre (Oonincx et al., 2010).

## iii. Impact de l'alimentation sur la composition

La composition de l'insecte lui-même en protéines ne semble pas particulièrement affectée par les variations de composition protéique de l'aliment, ce qui est plutôt positif car on pourrait s'attendre à une diminution importante pour un aliment pauvre en azote (Van Broekhoven et al., 2015). Cependant, la qualité des protéines doit être prise en

compte, car selon notamment leur digestibilité, certaines alimentations avec des taux corrects peuvent être à l'origine d'un déficit protéique et entraîner des problèmes de développement évoqués précédemment (Li et al., 2013).

La composition en lipides semble plus variable que celle en protéines, mais reste plutôt stable lors de variation des taux de lipides et de protéines chez les insectes étudiés. Cependant, la composition en acides gras est, quant à elle, plus influencée par la composition de l'aliment proposé : c'est donc un élément à prendre en compte dans la production pour obtenir un produit à base d'insectes avec un profil en acides gras favorable (Oonincx et al., 2015; Van Broekhoven et al., 2015).

L'utilisation de déchets et de sous-produits de l'alimentation humaine présenterait donc un avantage écologique pour l'élevage d'insectes. Cependant, la sélection doit se faire sur les risques liés à chaque élément introduit et à la composition de l'alimentation finale notamment le taux de protéines qui doit être maintenu au minimum au niveau des valeurs de l'alimentation conventionnelle, si l'on ne veut pas risquer que le développement soit affecté. Si la législation actuelle et des considérations sanitaires excluent pour l'instant l'utilisation de certains produits (comme les déjections) pour une utilisation dans l'alimentation des insectes, des études ont montré leur efficacité dans la production de matière organique par la mouche soldat notamment (Pleissner and Rumpold, 2018; Smetana et al., 2016).

## **2. Emissions de gaz à effet de serre et pollution des sols**

Plusieurs molécules sont à l'origine de la pollution de l'air et des sols. Parmi les gaz à effet de serre, on retrouve principalement le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). L'ammoniac (NH<sub>3</sub>) est quant à lui le rejet principal des animaux contribuant à la pollution des sols et de l'eau. Actuellement, les productions animales seraient à l'origine des rejets suivants (Oonincx et al., 2010) :

- 9% des rejets de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)
- 35-40% des émissions de méthane (CH<sub>4</sub>)
- 65% des rejets de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O)
- 64% des émissions d'ammoniac (NH<sub>3</sub>)

L'élevage traditionnel jouant un rôle majeur dans la production de gaz à effet de serre, il s'agit de déterminer les avantages des élevages d'insectes en ce qui concerne les rejets des différents polluants de l'air et du sol.

### ***a. Potentiel de réchauffement global***

Pour une même quantité de gaz, le CO<sub>2</sub> a un potentiel de réchauffement climatique limité par rapport aux autres gaz à effets de serre. C'est pourquoi lorsque l'on veut mesurer l'impact des rejets de gaz à effet de serre de manière globale, on applique des coefficients pour obtenir une quantité sous le terme de « potentiel de réchauffement global » (noté « CO<sub>2</sub>-équivalent ») qui s'exprime de la manière suivante (Oonincx and de Boer, 2012) :

$$\text{CO}_2\text{-éq} = 1 \times \text{CO}_2 + 25 \times \text{CH}_4 + 298 \times \text{N}_2\text{O}$$

Afin de comparer les différents types d'élevage, on applique une méthode d'évaluation normalisée : l'analyse du cycle de vie (ACV). Celle-ci prend en compte l'impact environnemental d'un système en considérant l'ensemble des aspects de cet impact, depuis la production des matières premières jusqu'à la fin du cycle de vie du produit. L'intérêt est que cette méthode est standardisée et notamment utilisée pour comparer les différents types d'élevage conventionnel, ce qui permet de faire des comparaisons pertinentes (Oonincx and de Boer, 2012).

Pour pouvoir comparer les élevages entre eux, les différents rejets sont à mettre en relation avec le poids de l'animal, et plus précisément le gain de poids : en effet il s'agit de savoir quel est le « coût » en matière de pollution pour chaque kilogramme de viande (ou d'insecte) produit.

En 2010, Oonincx et al. obtiennent des valeurs de production de gaz à effet de serre produits par l'animal lui-même lors de son élevage suivantes (valeurs en g de CO<sub>2</sub>-éq produit pour 1kg de masse corporelle gagnée) (Oonincx et al., 2010) :

- Insectes (5 espèces) : 2-122 g CO<sub>2</sub>-éq/kg
- Bœuf : 2850 g CO<sub>2</sub>-éq/kg
- Porc : 80-1130 g CO<sub>2</sub>-éq/kg

Il y a bien une corrélation entre production de gaz à effet de serre et gain de poids par les animaux d'élevage, insectes ou conventionnels. Si l'on relève uniquement les

valeurs pour les insectes couramment destinés à la consommation humaine dans cette étude (*Tenebrio molitor*, *Acheta domesticus* et *Locusta migratoria*), on note que celles-ci se trouvent entre 2 et 17 g/kg, ce qui est très limité par rapport aux espèces comparées (Oonincx et al., 2010).

On doit aussi considérer un potentiel de réchauffement climatique plus global, auquel s'ajoutent les émissions liées à l'alimentation (production, transport) et au chauffage notamment (Oonincx and de Boer, 2012). Comme l'apport en protéines est aujourd'hui le facteur limitant, il est intéressant de voir plus précisément la quantité de CO<sub>2</sub>-équivalent produite pour 1 kg de protéines produites par l'animal. En comparant avec les valeurs obtenues pour diverses protéines animales par De Vries et al. en 2010, les chercheurs obtiennent la comparaison suivante (Figure 18) :

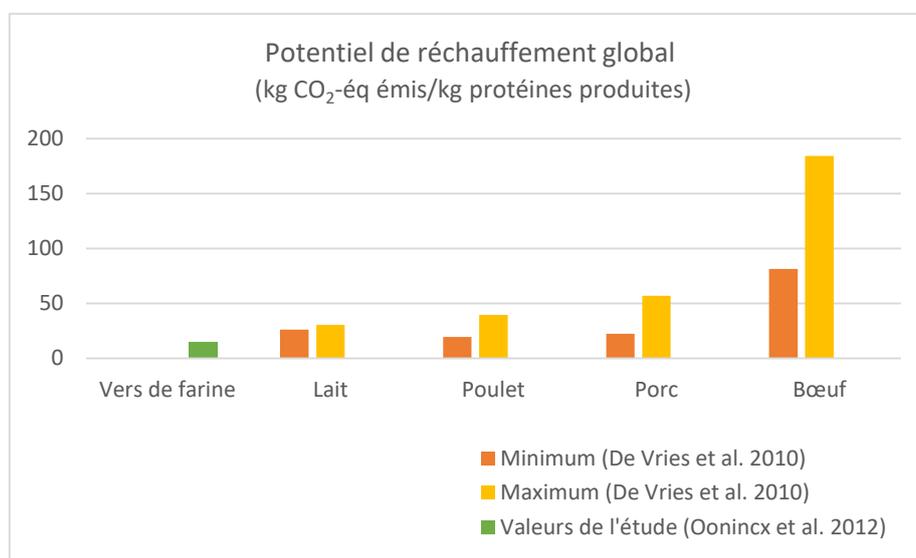


Figure 21 : Comparaison interspécifique du potentiel de réchauffement global. D'après (de Vries & de Boer, 2010; Oonincx & de Boer, 2012)

Dans cette étude, la production de protéines de l'élevage de vers de farine considéré (*Tenebrio molitor* et *Zophobas atratus*) a donc un potentiel de réchauffement climatique significativement plus bas que celle des élevages conventionnels : même en ce qui concerne la production de lait, on reste aux alentours de 1,5 fois plus d'émission de GES pour la même quantité de protéines (Oonincx and de Boer, 2012).

### **b. Emissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)**

i. Emission de CO<sub>2</sub> par les animaux

On pense d'abord au CO<sub>2</sub> émis naturellement lors de la respiration d'un organisme animal. Cette production est influencée par différents facteurs, et notamment la nature de l'organisme considéré : l'espèce et le stade (larve, nymphe, adulte) pour un insecte (Bailey and Singh, 1977).

L'environnement joue aussi un rôle dans la production de CO<sub>2</sub> : par exemple, une température élevée aura pour effet d'augmenter la production de CO<sub>2</sub> pour un même organisme. Dans l'étude publiée en 2010 par Oonincx et al., les chercheurs notent une quantité de CO<sub>2</sub> produite par kg plus importante pour le criquet (*Locusta migratoria*) que pour les autres espèces considérées. Or, l'un des paramètres qui diffèrent chez cette espèce, est la température d'élevage égale à 32°C au lieu de 28°C au maximum pour les autres espèces. Ainsi, une augmentation de la température serait à l'origine d'une consommation plus importante de CO<sub>2</sub> au moins chez certaines espèces et est donc à prendre en compte au sein de l'élevage (Oonincx et al., 2010).

Un autre élément qui influence ces émissions est le degré d'activité de l'organisme considéré, que ce soit une énergie consacrée à l'alimentation et à la fabrication de masse corporelle, ou bien de simples déplacements permis ou non par le logement. Plusieurs études montrent qu'une augmentation de l'activité physique ainsi que l'action de se nourrir chez certains insectes augmentent significativement la production de CO<sub>2</sub> par rapport à des animaux immobiles et/ou non nourris (Duncan et al., 2002; Gouveia et al., 2000). Lorsque les animaux sont élevés avec de la nourriture à volonté et dans un cadre où les déplacements sont permis, ils consomment des quantités de CO<sub>2</sub> relativement élevées par rapport à des situations plus « pauvres » (jusqu'à 10 fois plus pour une même espèce), et la production de gaz est alors positivement corrélée à leur gain de poids. Le rapport CO<sub>2</sub> émis/gain de poids reste très inférieur chez les insectes par rapport aux espèces de l'élevage conventionnel (Collavo et al., 2005; Nakagaki and Defoliart, 1991; Oonincx et al., 2010; Ramos-Elorduy, 2008).

ii. Autres émissions de CO<sub>2</sub>

La production de CO<sub>2</sub> en élevage est certes en partie due à la respiration des animaux, mais intervient surtout lors de la production et du transport de leur alimentation et plus globalement pour toute l'énergie nécessaire à l'élevage de ces animaux (chauffage, carburants). On retrouve donc les mêmes enjeux pour les élevages d'insectes que pour les élevages traditionnels : l'origine de l'alimentation distribuée doit être contrôlée pour en limiter l'impact en termes de réchauffement climatique. Dans le but de limiter les émissions de CO<sub>2</sub>, on relève les points de contrôle suivants :

- production de l'aliment,
- transport de l'aliment vers l'élevage,
- maintien des conditions de température, de luminosité et d'humidité,
- procédures d'abattage et de transformation,
- transport jusqu'aux consommateurs.

Une limitation globale du transport des insectes et produits issus d'insectes, ainsi qu'une étude sur l'utilisation globale d'énergie pour leur élevage et leur transformation sont des pistes générales pour limiter les émissions de CO<sub>2</sub> globales (FAO, 2006).

### ***c. Emissions de méthane (CH<sub>4</sub>)***

Le méthane est un gaz au potentiel de réchauffement climatique 25 fois supérieur à celui du CO<sub>2</sub>, d'où l'importance de favoriser la diminution de ses émissions (Oonincx and de Boer, 2012). Parmi les élevages conventionnels, il est principalement produit par les bovins (et par les ruminants plus généralement). En effet, ce gaz est formé par des bactéries du tube digestif, qui par le fonctionnement de la rumination, est émis en plus grande quantité par les bovins (les ovins et caprins y participant aussi mais dans une moindre mesure). 70% de ce gaz est émis lors de l'éructation (émission de gaz provenant du système digestif par la bouche), et 30% sont émis au niveau des zones d'accumulation des déjections de ces animaux (CIVAM Bretagne, 2010).

Comme c'est le cas parmi les mammifères, des différences existent en termes d'émission de méthane entre les différentes espèces d'insectes. Une production de méthane a été détectée chez les insectes suivants (Hackstein and Stumm, 1994) : blattoptères (blattes et termites) et certains coléoptères (famille des scarabéidés). Ces insectes pouvant être utilisés pour certains en alimentation animale ou dans le cadre

de dégradation de déchets, la question se pose de leur impact sur l'environnement dans le cadre d'un élevage à grande échelle, étant donné qu'à l'état naturel les termites sont déjà à l'origine de quasiment 15% des émissions de méthane globales (Rasmussen and Khalil, 1983).

A priori, les autres ordres et autres familles de coléoptères ne sont pas concernés par la production de méthane, ce qui est un avantage par rapport aux bovins principalement, mais aussi aux autres animaux d'élevage.

#### ***d. Émissions de composés azotés***

Le protoxyde d'azote ( $N_2O$ ) est un gaz qu'on trouve certes en petite quantité dans l'atmosphère en comparaison avec le  $CO_2$ , mais son pouvoir de réchauffement climatique est 298 fois plus fort que celui du  $CO_2$ . Il a de plus un rôle destructeur de la couche d'ozone, donc augmente à terme la quantité d'ultraviolets atteignant la surface de la Terre. Le cycle de l'azote est globalement très sensible aux conditions climatiques, température et humidité, ce qui crée un cercle vicieux puisque le réchauffement climatique est à l'origine d'une augmentation des émissions de ce gaz par les sols (FAO, 2006). Comme dit précédemment, plus de la moitié des émissions de  $N_2O$  sont dues à l'agriculture, et plus précisément à la fertilisation des sols cultivés pour l'alimentation des animaux d'élevage qui l'obtiennent à partir d'ammoniac ( $NH_3$ ). Le  $NH_3$  est le deuxième élément azoté qui pose problème en termes de pollution : utilisé pour la fertilisation des végétaux pour l'alimentation en élevage, on le retrouve donc au niveau des terres cultivées, mais aussi dans les déjections azotées des animaux d'élevage (urines et acide urique). Il a donc un impact non négligeable sur le cycle de l'azote, à la fois dans l'air et dans le sol (FAO, 2006).

Est-ce que ce cercle vicieux pourrait être limité dans le cas d'un élevage d'insectes ?

##### **i. Émissions de $N_2O$**

La production de  $N_2O$  n'a été détectée que pour deux espèces dans l'étude de Oonincx et al. en 2010 : *Tenebrio molitor* et *Locusta migratoria*, plus de 2,5 fois plus élevé pour le criquet en pondérant avec la prise de masse corporelle (Oonincx et al.,

2010). Cependant, la variabilité est très grande au sein d'une même espèce, certaines études sur des espèces conventionnelles trouvant des quantités négligeables (sur des poulets de chair notamment) et d'autres en mesurant de plus grandes. Les mesures sont difficiles à obtenir pour les émissions de ce gaz en élevage, ce qui est supposé être à l'origine de telles disparités (Oonincx et al., 2010).

## ii. Emissions de NH<sub>3</sub>

Les études s'étant intéressées à la production de NH<sub>3</sub> en élevage montrent une grande variabilité quant aux valeurs trouvées, ce qui est dû au caractère très influençable de ces émissions : température, humidité, type de nourriture, activité et substrat d'élevage (Oonincx et al., 2010). Un autre élément récurrent parmi les études, aussi bien sur les insectes que les animaux d'élevage conventionnels, est le fait qu'on assiste à un rythme jour/nuit pour les émissions : une augmentation des émissions durant la journée par rapport à la nuit. On peut penser que cela est dû à une différence dans le niveau d'activité notamment, mais cet élément peut être exclu puisque ce même rythme est retrouvé chez des espèces d'insectes nocturnes de la même façon que chez des espèces diurnes (Faulkner and Shaw, 2008; Oonincx et al., 2010).

Les résultats de l'étude de Oonincx, montrent que si l'on considère les émissions au sein de l'élevage (en excluant les zones d'épandage et de cultures), on obtient des valeurs inférieures pour trois espèces d'insectes par rapport à trois autres animaux d'élevage (Oonincx et al., 2010):

- insectes (*A. domesticus*, *L. migratoria*, *B. dubia*) : 3-5,4 mg/kg/jour,
- porcs : 4,8-75 mg/kg/jour,
- bovins : 14-170 mg/kg/jour.

Il est difficile de conclure sur de telles valeurs, notamment étant donné l'hétérogénéité des mesures et la petite échelle pour l'élevage d'insectes. Cependant, deux des espèces considérées ici n'ont pas montré de rejets significatifs (*Tenebrio molitor* et *Pachnoda marginata*), donc il pourrait être intéressant de voir si certains insectes ont bien des émissions limitées en les pondérant avec la masse corporelle produite (Oonincx et al., 2010).

### 3. Utilisation des ressources en eau

La quantité d'eau utilisée par l'agriculture représente une part non négligeable des réserves en eau de la planète, et un tiers de cette eau est réservée à l'élevage (Ridoutt et al., 2012). Pour mesurer l' « empreinte eau » d'un secteur d'activité, il faut considérer différents contextes d'utilisation, ce qui donne les éléments suivants pour un élevage :

- utilisation d'eau pour la production de l'alimentation (culture et préparation),
- utilisation d'eau pour la boisson des animaux,
- utilisation d'eau pour le nettoyage des infrastructures.

En additionnant ces différentes empreintes, on obtient l'empreinte eau totale d'un élevage donné (Miglietta et al., 2015).

Quel que soit le type d'élevage, le plus gros consommateur d'eau reste l'alimentation, la quantité étant très variable selon le type d'aliment : type de culture (types de végétaux, climat, irrigation ou non) et transformations subies avant nourrissage (utilisation d'eau pour le mixage notamment). Les aliments dits « concentrés » sont de plus en plus utilisés en élevage alors qu'ils sont à l'origine d'une empreinte eau plus importante que des végétaux non ou peu transformés. On pourrait alors penser que le fait de diminuer leur utilisation serait positif pour l'empreinte eau des élevages. Cependant, comme ils permettent un gain de poids chez les animaux plus important qu'avec un aliment non concentré, on arrive de cette manière à un équilibre en termes de productivité (Mekonnen and Hoekstra, 2012).

Pour les vers de farine, l'alimentation est principalement basée sur des concentrés mais aussi sur des végétaux frais (rondelles de carottes, feuilles de choux) qui sont utilisés principalement pour l'apport en eau justement. Dans l'étude de Miglietta et al. en 2015, on retrouve cette tendance générale d'un poids considérable de l'utilisation des ressources en eau pour produire l'alimentation par rapport à celle qui se fait sur l'élevage même (Miglietta et al., 2015). Les chercheurs étudient ici deux espèces de vers de farine (*T. molitor* et *Z. morio* dont les résultats sont rassemblés) dans un système d'élevage standard, et font une estimation de l'utilisation d'eau par cet élevage de la même manière que cela a été fait précédemment pour des élevages conventionnels (utilisation de l'Analyse du Cycle de Vie) (Miglietta et al., 2015).

Les chercheurs obtiennent une consommation d'eau pour la production d'une tonne d'insectes très comparable à l'utilisation d'eau pour la production de poulet de

chair, et cette empreinte eau est plus importante ici pour les élevages de porcs et surtout de bovins. La différence devient significative et favorable aux insectes face au poulet lorsqu'on considère l'efficacité de production de protéines pour une même quantité d'eau. Cependant, ces résultats sont à relativiser en lien avec le caractère trompeur de l'indice utilisé ici : l'« empreinte eau » tient compte notamment des eaux de pluies qui ne sont pas réellement « utilisées » par les animaux et plus généralement par l'élevage et retourne dans le cycle de l'eau (captation par les sols, évapotranspiration par les plantes). Or cette eau représente une part majeure de la consommation attribuée à l'élevage bovin, ce qui rend difficile une comparaison pertinente des résultats (Rosner et al., 2016).

Un autre aspect de la « consommation » d'eau par les élevages, est leur impact en terme de pollution de celle-ci notamment par l'utilisation de pesticides dans les cultures ainsi que les émissions de substances azotées en général : il y a ainsi une diminution de l'eau potable liée directement à l'élevage (Ridoutt et al., 2012).

#### **4. Utilisation des terres agricoles**

L'utilisation des terres pour l'élevage est un autre élément à prendre en compte dans le cadre d'une volonté d'évoluer vers des productions animales plus durables. Cette surface réservée à l'élevage peut être divisée en deux éléments : la surface utilisée pour produire l'alimentation des animaux et celle utilisée pour l'élevage même (Flachowsky et al., 2017).

##### ***a. Surface utilisée pour produire l'alimentation des animaux d'élevage***

Concernant la surface utilisée pour la production de l'alimentation, plusieurs éléments ont déjà été évoqués précédemment concernant l'impact de l'élevage : le type de culture, l'utilisation de fertilisants, de pesticides vont avoir un impact sur les terres utilisées et l'environnement à une échelle plus ou moins importante. Un autre aspect de cette problématique est que les terres mobilisées pour l'élevage ne sont alors plus disponibles pour une population qui pourtant grandit et nécessiterait donc plus de terres arables pour produire son alimentation. Précisons cependant que concernant les espaces réservés aujourd'hui au pâturage des ruminants, une part

considérable de ces terres n'est de toute façon pas apte à accueillir des cultures de céréales ou encore d'oléagineux. Hors considérations alimentaires, la déforestation due au remplacement des forêts par des terres agricoles est un problème majeur à l'échelle du globe car ce phénomène est à l'origine d'une augmentation de la production de gaz à effet de serre qui participe au réchauffement climatique (FAO and Van Huis, 2013).

L'élevage d'insectes présente des avantages par rapport à l'utilisation des terres cultivées. Comme développé précédemment, il semblerait que les insectes convertissent de manière plus efficace les denrées alimentaires fournies, ce qui réduit en conséquences la surface agricole utilisée pour le même rendement en termes de poids d'insectes produits (Lundy and Parrella, 2015; Oonincx and de Boer, 2012; Van Broekhoven et al., 2015). Il reste cependant très proche des élevages de poulets de chair notamment. Si on s'intéresse aux chiffres en considérant la production de protéines animales pour un même volume de nourriture, l'élevage d'insectes présente un intérêt d'autant plus marqué même par rapport à la production de viande de poulet (Lundy and Parrella, 2015; Oonincx et al., 2015).

Dans leur étude publiée en 2012, Oonincx et al. comparent la surface utilisée pour la production d'insectes avec celle utilisée pour la production de viande en élevage conventionnel. Pour produire 1 kg d'insectes, 3,56m<sup>2</sup> sont utilisés, cette surface étant en majeure partie constituée par l'alimentation (plus de 99%) (Oonincx and de Boer, 2012). C'est le cas pour les autres types d'élevage, mais ici on a une consommation globale significativement plus basse pour la même quantité d'insectes et de protéines d'insectes produites :

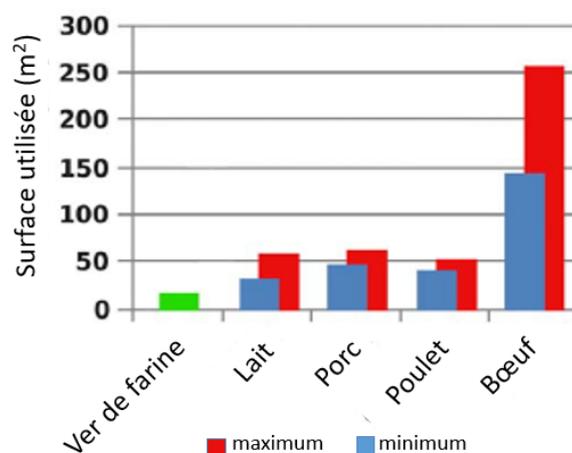


Figure 22 : Surfaces nécessaires pour la production d'1 kg de protéines pour quatre espèces comparées.

Source : Oonincx et al. 2012.

La production d'insectes est comparable à la production de soja, mais légèrement plus consommatrice d'espace. Cet aspect peut être relativisé dans le sens où le développement de culture de soja pose des questions en termes de biodiversité végétale notamment pour les terres concernées (Alexander et al., 2017).

Un deuxième aspect, lui aussi déjà évoqué, est la possibilité de nourrir à terme ces insectes avec une certaine proportion de sous-produits de l'industrie agroalimentaire et de déchets divers issus des produits non consommés par la population. S'il est alors possible de nourrir les insectes que nous consommons sans utiliser de surface agricole supplémentaire, l'impact de tels élevages en termes d'occupation de l'espace sera donc limité.

### ***b. Surface d'élevage utilisée par les animaux eux-mêmes***

Les animaux d'élevage occupent eux-mêmes une certaine part du territoire, bien qu'elle soit souvent limitée par rapport aux surfaces de culture. Cette surface occupée dépend du type d'élevage, notamment de son caractère plus ou moins intensif. En effet, pour une même espèce, il existe plusieurs types d'élevages qui pour un même nombre d'animaux occupent des surfaces très variables : on peut notamment donner l'exemple de la vache, élevée pour sa viande dans des systèmes intensifs connus sous le nom de « feed-lots » aux Etats-Unis, en comparaison avec les systèmes d'élevage extensif rencontrés en Australie notamment. L'intensification peut présenter un avantage en termes de surface occupée, mais on atteint rapidement des limites en termes d'éthique notamment (Pali-Schöll et al., 2018).

La possibilité d'élever des animaux sur de plus ou moins grandes surfaces dépend bien sûr de l'espèce considérée. Chacune a en effet des caractères bien définis en matière de physiologie et de comportement auxquelles les conditions de l'élevage doivent être adaptées. Les élevages industriels de porcs et surtout de volailles, fonctionnent avec un nombre important d'animaux au m<sup>2</sup>.

Chez les insectes, une densité élevée est envisageable en particulier chez certaines espèces qui vivent naturellement en grand nombre sur de petites surfaces. Par exemple, la densité donnée pour un élevage de grillon domestique (*A. domesticus*) est d'environ 2,5 cm<sup>2</sup>/grillon (Clifford and Woodring, 1990). Pour ces insectes, des cartons type boîte à œufs sont utilisés pour enrichir le milieu et permettent notamment

d'augmenter la surface disponible par individus en en créant en hauteur. En termes de densité, on pense principalement aux vers de farine, qui peuvent être élevés de manière verticale dans des bacs où la densité est relativement importante étant donné qu'ils n'ont pas besoin d'une grande quantité de lumière pour vivre (Grau et al., 2017). La surface au sol est donc elle aussi facilement diminuée par ce système d'élevage à la verticale permis aussi par le faible gabarit de ces animaux.



*Figure 23 : Aperçu d'un élevage de vers de farine avec des colonnes de bacs dans lesquels se trouvent les vers.*

*Source : crokfun.com*

Cependant, cette densité doit être contrôlée, d'une part pour des questions éthiques et d'autre part pour des raisons sanitaires et de productivité puisque du cannibalisme peut se développer dans un contexte de densité d'individus trop élevée (Clifford and Woodring, 1990).

### ***c. Scénarios d'une substitution partielle de la production actuelle par d'autres produits dont les insectes***

Une étude de 2017 a imaginé des scénarios lors desquels 50% des productions animales actuelles sont remplacées par des substituts, et notamment par les insectes, avec pour base de maintenir les apports énergétique et protéique globaux actuels. Si l'on considère uniquement l'utilisation de l'espace, les productions les plus intéressantes semblent être le tofu (substitut à base de soja) et les insectes, mais ils restent tout de même proches de la production d'œuf et de viande de poulet (Alexander et al., 2017). Il est évident que l'utilisation des terres n'est qu'un seul aspect de l'impact écologique de la production de protéines, mais il ressort de cette étude qu'une diminution de la proportion de production de ruminants pour favoriser notamment des

productions avec des efficacités de conversion plus intéressantes (œufs et poulet principalement) serait favorable à une diminution de l'espace occupé. Plus généralement, limiter la surconsommation et le gâchis alimentaire serait déjà un premier pas, mais les assortir à une intégration de nouveaux modes de consommation comme celle d'insectes ou de substituts végétaux à la viande participerait d'autant plus à une diminution de l'impact spatial actuel (Alexander et al., 2017).

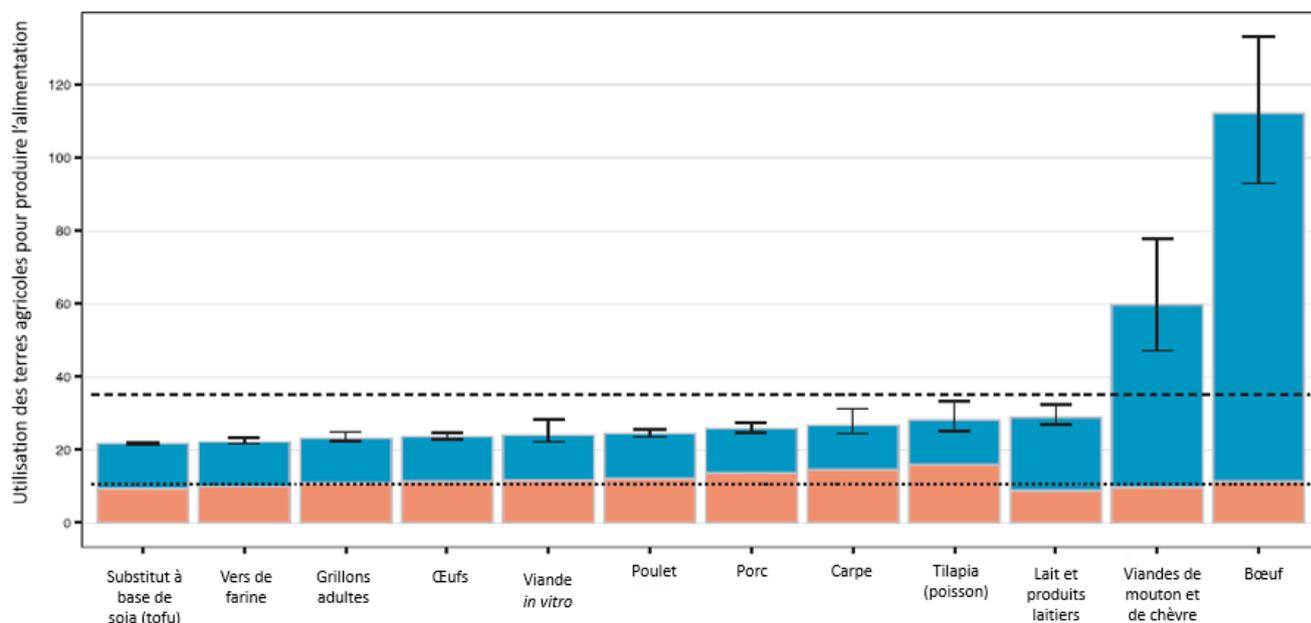


Figure 24 : Comparaison de l'utilisation des terres agricoles pour les différents scénarios imaginés où 50% des apports en énergie et protéines est remplacé par le type de production indiqué. En bleu, part de la surface réservée aux animaux. En rose, part de la surface réservée aux cultures pour leur alimentation. Ligne en tirets : surface totale moyenne utilisée en 2011. Ligne en pointillés : surface moyenne réservée aux animaux en 2011. Source : Alexander et al. 2017.

## 5. Consommation d'énergie en élevage

La consommation d'énergie est un sujet transversal en termes d'impact écologique. En effet, si certaines productions sont plus demandeuses en énergie, il y a différents aspects de cette consommation qui sont plus ou moins favorables à l'environnement.

Les insectes étant poïkilothermes, leur élevage nécessite un environnement contrôlé du point de vue température et humidité, ce qui est à l'origine de dépenses énergétiques non négligeables (électricité et gaz naturel dans l'étude de Oninckx). L'utilisation globale d'énergie pour produire 1kg de protéines d'insectes dans cette étude est plus importante que pour la production de lait et de viande de poulet, mais

est comparable à un élevage de porc et plus faible en moyenne que pour la production de bœuf (Oonincx and de Boer, 2012). Ces chiffres sont largement influencés par l'alimentation des animaux (modes de production et provenance) et par des indices de consommation différents selon l'espèce considérée. Certaines techniques sont évoquées pour limiter l'utilisation d'énergie en élevage d'insectes et demandent à être approfondies : il s'agit notamment du fait d'utiliser la chaleur produite par les larves les plus âgées pour réchauffer les stades les plus précoces qui nécessitent des températures plus élevées pour se développer efficacement.

Dans une étude plus large, qui fait le bilan total de consommation d'énergie depuis la culture de l'alimentation jusqu'à l'assiette du consommateur, ce sont les procédures de déshydratation et de cuisson qui sont les plus consommateurs d'énergie en élevage d'insectes (Smetana et al., 2015). Pour d'autres productions comme la viande *in vitro*, cette consommation se situe plutôt lors de la fabrication de cet aliment, et, dans ce cas précis, est massive.

L'impact environnemental de la consommation d'énergie va beaucoup dépendre du type d'énergie utilisé, notamment si l'on compare l'utilisation d'énergies fossiles par rapport à des énergies plus durables qui auront donc un impact moindre.

## **6. Bilan et perspectives en matière d'écologie**

L'élevage d'insectes possède des avantages en matière d'écologie par rapport aux productions animales conventionnelles, mais ce système est récent et présente donc une certaine marge d'amélioration en termes de productivité notamment comme ça a été le cas précédemment pour d'autres types de production (Smetana et al., 2015). Les études considérant la réutilisation de déchets et l'alimentation en général devraient permettre de rendre cette production d'autant plus efficace et durable.

Il a été montré qu'une réduction de la consommation de viande et de produits animaux en général est à l'origine d'une diminution majeure notamment des émissions de gaz à effets de serre liées à notre alimentation (Scarborough et al., 2014). En plus d'une réduction de la consommation de ces produits, l'utilisation de substituts à la viande ayant des qualités nutritionnelles proches est envisagée pour réduire notre impact sur l'environnement. Une étude de 2015 qui considère différents substituts à la viande conventionnelle a ainsi classé ces produits en fonction de leur impact

écologique global, en prenant en compte tout le circuit de production jusqu'à l'assiette du consommateur (Smetana et al., 2015) :

- La viande *in vitro* et les substituts à base de mycoprotéines sont les produits les moins avantageux.
- Un impact moyen est décrit pour du poulet produit localement (témoin le plus avantageux pour la viande conventionnelle), pour les substituts à base de lait et à base de gluten de blé.
- L'impact est ici significativement plus faible pour les substituts à base de soja et à base d'insectes.

Ainsi, la substitution partielle de la viande conventionnelle par des substituts à base d'insectes et de soja notamment présente des avantages en termes d'écologie.

Des études chinoises s'intéressent aux insectes pour l'alimentation des astronautes dans l'espace : le ver de farine ou encore le ver à soie pourraient fonctionner dans un système de production peu spacieux et rapide, avec recyclage de leurs déjections réutilisées pour fertiliser les plantes qui les nourrissent. Ces études montrent une réussite partielle de ce type de système d'alimentation, mais les résultats restent prometteurs en comparaison avec d'autres types d'organismes animaux précédemment envisagés (Li et al., 2013; Yang et al., 2010). L'utilisation des déjections des insectes d'élevage comme biofertilisants est déjà pratiquée en Europe et constitue donc un débouché pour ces coproduits.

## **B. DÉVELOPPER L'ÉLEVAGE D'INSECTES POUR NOURRIR LA PLANÈTE**

L'un des enjeux primordiaux de la production d'insectes pour la consommation humaine est l'objectif de nourrir au mieux la planète dans les décennies à venir, malgré une population mondiale grandissante (FAO et al., 2013). Comme développé précédemment, l'élevage d'insectes présente des capacités de production intéressantes et il peut être également favorable économiquement. En effet, il permet une source de revenus non négligeables dans certains pays d'Afrique notamment, et le développement d'élevages dans des régions de récolte présenterait un avantage économique certain pour les populations concernées (van Huis, 2016). Dans un contexte où une partie des habitants de notre planète souffre déjà de malnutrition et

de carences en protéines et différents micronutriments, il convient de s'intéresser au potentiel nutritionnel des insectes. Peuvent-ils se substituer de manière satisfaisante à une partie de la demande en protéines animales ? Quels seraient les bénéfices du développement de la consommation d'insectes en termes de nutrition et de santé pour l'ensemble de la population ?

L'apport des insectes en divers nutriments ne se résume pas à des taux de protéines ou de lipides, et présente une grande variabilité selon les espèces, les stades de développement et l'alimentation de ces animaux (Rumpold and Schlüter, 2013). De nombreuses recherches ont été et sont actuellement menées sur la composition précise des insectes et les facteurs modulant cette composition.

## **1. Composition générale des insectes et comparaison aux apports recommandés**

En moyenne, les nutriments présents en plus grande proportion dans les insectes sont les protéines, puis les lipides, suivies par les fibres, les glucides et enfin par les cendres (minéraux principalement). L'énergie apportée par la consommation d'insectes est importante et comparable aux produits carnés étant données les fortes teneurs en protéines et lipides : entre 400 et 500 kcal/100g en moyenne, jusqu'à 770 kcal/100g pour certains lépidoptères notamment (Rumpold and Schlüter, 2013).

### ***a. Composition des insectes en protéines et acides aminés***

C'est de loin l'aspect le plus intéressant en terme de couverture des besoins, car c'est la demande en protéines qui augmente dans le monde et ce sont bien souvent elles qui font défaut dans des cas de sous-nutrition (van Huis, 2013). La consommation de viande telle que nous la connaissons n'étant pas considérée comme durable, les insectes sont présentés comme une alternative intéressante pour diminuer (ou du moins ne pas augmenter) la production de viande car pouvant apporter des protéines et acides aminés très proches des apports d'une viande de bœuf ou de poulet.

L'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) donne les recommandations en termes d'apports suivantes : 0,66g/kg/jour de protéines pour un adulte moyen (variations selon

l'âge, le statut physiologique, les éventuelles pathologies) (2007). Cet objectif est atteint avec les viandes consommées habituellement, mais qu'en est-il des insectes ?

L'étude de Rumpold & al. en 2013, fait le bilan des différentes publications jusqu'alors disponibles ayant étudié la composition de 236 insectes en différents nutriments. Les insectes sont regroupés par ordre et une moyenne pour chaque valeur est faite au sein de chaque ordre (et non par espèce) (Rumpold and Schlüter, 2013). La Figure 22, extraite de cette étude, illustre bien le fait que les protéines constituent l'élément majeur de la composition des insectes, avec cependant une variabilité importante entre les différents ordres. On note aussi des écarts marqués au sein d'un même ordre entre les différentes études. Cela s'explique en premier lieu par le grand nombre d'espèces étudiées pour un même ordre, et deuxièmement par la variabilité d'origine des insectes (récoltés dans la nature ou bien élevés dans des conditions variables) et les différences supposées entre les différents stades physiologiques pourtant ici tous rassemblés.

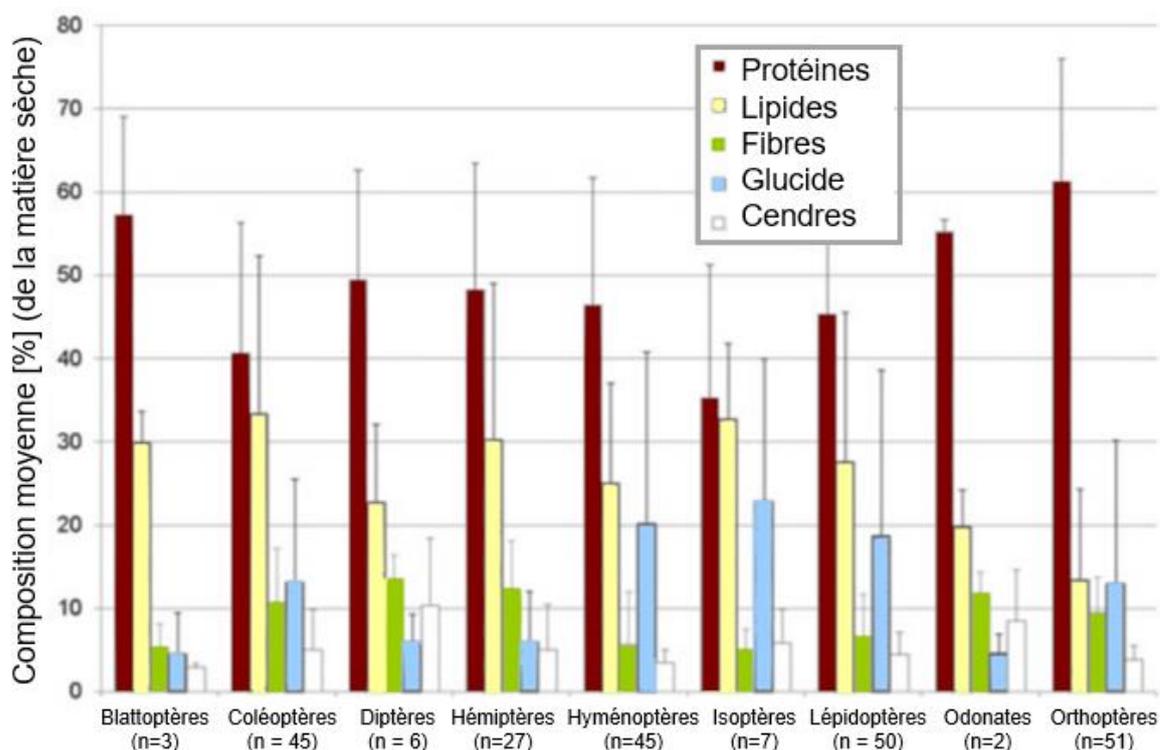


Figure 25 : Composition moyenne en nutriments pour chaque ordre d'insectes.

Source : Rumpold et al., 2013

Les valeurs moyennes par ordre s'étendent de 35% de protéines (valeur basée sur la matière sèche) chez les blattoptères (termites et blattes) à 62% chez les orthoptères (criquets, grillons et sauterelles). Certaines sauterelles comme la sauterelle à pattes

rouges (*Melanoplus femurrubrum*) atteignent des valeurs entre 70 et 77% de protéines (Rumpold and Schlüter, 2013). En comparaison, le contenu en protéines dans une graine de soja est en moyenne de 35,8% (Rumpold and Schlüter, 2013), donc une favorisation des insectes et notamment des orthoptères par rapport aux protéines végétales présenterait un avantage (en alimentation animale notamment). La proportion de protéines est très comparable à celle trouvée pour des viandes conventionnelles.

Il convient de s'intéresser plus précisément aux méthodes d'obtention de ces taux qui ne prennent pas en considération tous les aspects de l'élément « protéine ». Tout d'abord, le calcul de taux de protéines est basé sur la quantité d'azote présente dans la matière considérée et prend donc en compte les atomes d'azote présents sous d'autres formes dans chaque organisme vivant (ANP : Azote non protéique) et ne constituant donc pas un réel apport de protéines (la chitine principalement). C'est la méthode de Kjeldhal qui est la plus couramment utilisée pour déterminer le taux de protéines d'un aliment : elle consiste à obtenir à partir d'azote organique contenue dans la matière étudiée, de l'azote minérale sous forme d'ions ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) à partir d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) par oxydation réalisée à ébullition. C'est la quantité de ses ions qui est mesurée et à partir de laquelle on détermine la quantité de protéines présente à l'origine en appliquant un coefficient multiplicateur conventionnel de 6,25 à la teneur obtenue. Cette technique étant largement répandue dans les calculs de taux protéiques des aliments, on peut considérer que les valeurs obtenues sont assez comparables selon les études, mais retenons qu'elles ne font que refléter le taux de protéines sans prendre en compte les autres sources d'ANP, et que certaines protéines sont présentes mais pas nécessairement utilisables par l'organisme qui les consomme (Churchward-Venne et al., 2017).

La qualité des protéines est un élément majeur à prendre en compte. En effet, elles ont une digestibilité variable, ainsi qu'une composition en acides aminés très inégale. Le DIAAS (Digestible Indispensable Amino Acid Score) est une image de la qualité des protéines, il prend en compte les apports en acides aminés essentiels (soit des acides aminés ne pouvant être produits par l'organisme d'un mammifère, donc notamment par l'être humain). De ce point de vue, les insectes sont très variables en termes d'équilibre en acides aminés essentiels, n'atteignant pas toujours les 100% de DIAAS, alors que la viande d'animaux habituellement consommés ainsi que le soja ont des scores à 100%. Cependant, cette approche en termes de couverture des besoins en acides aminés essentiels (AAE), est assez superficielle et ne prend pas en compte

la diversité de ses acides aminés qui pour certains ont des rôles primordiaux au sein d'un tissu donné. La leucine notamment a un rôle majeur dans la synthèse des protéines musculaires et elle est présente en grande quantité chez certaines espèces d'insectes (Churchward-Venne et al., 2017).

Pour chaque acide aminé, l'OMS recommande des quantités minimales d'apport par jour et par kilogramme. Les données issues d'un grand nombre d'études et regroupées par Rumpold et al. en 2013, montrent une couverture des besoins en acides aminés assez complète par rapport aux recommandations lors de consommation d'insectes, et très comparable à celle obtenue avec des produits animaux conventionnels.

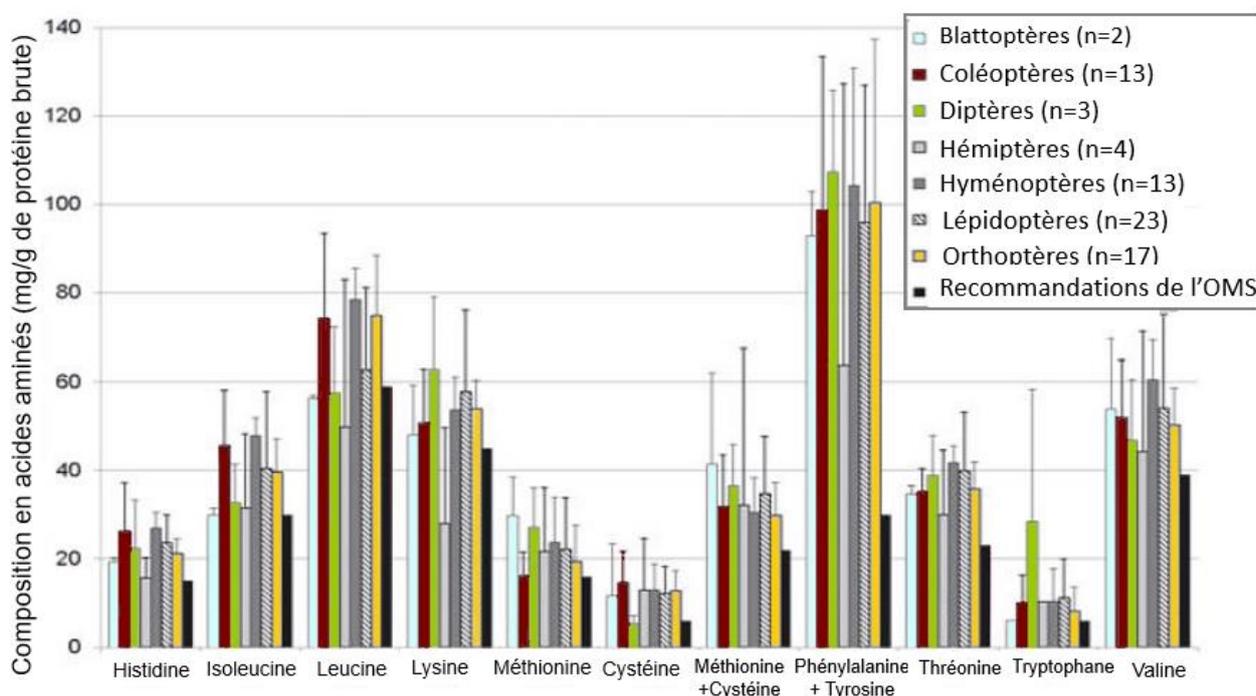


Figure 26 : Profils comparés en acides aminés pour les différents ordres d'insectes.

Source : Rumpold & Schlüter, 2013.

Seuls quelques insectes semblent limités pour certains apports : les diptères (mouches) qui sont limités en leucine et cystéine, et les hémiptères (cigales, punaises) aux proportions d'isoleucine, de lysine, de phénylalanine, tyrosine et valine un peu basses.

En ce qui concerne la digestibilité des protéines, elle est compliquée à déterminer. Le plus souvent on l'évalue avec des méthodes enzymatiques assez variables selon les études, qui sont effectuées *in vitro* pour la plupart, alors qu'il n'existe que quelques études chez l'animal (Churchward-Venne et al., 2017). Les taux sont globalement élevés chez les insectes, et augmentés par le retrait de l'exosquelette de l'animal.

## **b. Composition des insectes en lipides et acides gras**

La composante lipidique des insectes a de même été étudiée précisément et présente aussi un intérêt considérable pour la nutrition humaine. Là encore, il existe une grande variabilité en fonction des espèces et des études considérées (Figure 22) et on retrouve certaines grandes tendances : les orthoptères présentent les teneurs en lipides les plus faibles avec une moyenne à 13,41%, alors que les coléoptères sont en moyenne à 33,40%, valeur la plus haute. Mais au sein d'une même famille, on trouve des différences considérables : certaines larves de lépidoptères ont des valeurs très élevées, avec un maximum de 77% atteint par *Phassus triangularis*, et certains coléoptères sont proches de 70% (*Rhynchophorus phoenicis*). Ces variations s'expliquent notamment par le fait que la quantité de lipides est très variable selon les stades (plus importante chez les larves et nymphes que chez l'adulte) et très dépendante de l'alimentation (Rumpold and Schlüter, 2013).

Si on s'intéresse plus précisément au profil en acides gras des insectes, on distingue les acides gras saturés des acides gras insaturés. Les acides gras saturés les plus couramment retrouvés sont l'acide palmitique et l'acide stéarique. Concernant les acides gras insaturés, on les sépare en deux catégories distinctes : acides gras monoinsaturés (AGMI) et acides gras polyinsaturés (AGPI). Chez les insectes, les AGMI constituent 22 à 48,5% des acides gras, et sont principalement représentés par l'acide palmitoléique et l'acide oléique. Les AGPI représentent 15,95 à 39,76% des acides gras des insectes étudiés, et il s'agit pour la majeure partie d'acide linoléique et acides linoléique,  $\alpha$ -linoléique et  $\gamma$ -linoléique. On retrouve généralement le même degré de saturation qu'avec la viande de poulet ou le poisson, mais les AGPI sont en plus grande quantité chez les insectes (DeFoliart, 1991). Pour la viande de porc et bovin, on a au contraire une plus grande richesse en AGMI (ANSES, 2015).

Concernant le rapport en AGPI omega-6/omega-3, les recommandations pour une bonne santé cardio-vasculaire chez l'homme sont les suivantes : il s'agit d'avoir un rapport inférieur à 5 : 1. Chez les insectes, il est situé généralement entre 19 :1 et 30 :1 (selon l'espèce et l'alimentation) contre 10-15 :1 pour la viande en général (Van Broekhoven et al., 2015) donc trop élevé. Mais certains insectes comme *Galleria mellonella* présentent un équilibre plus favorable, entre 4 :1 et 14 :1 selon les études, et il a été montré que la proportion d'oméga-3 peut être augmentée par l'alimentation

(Finke, 2002; Francardi et al., 2017).

La proportion de cholestérol est elle aussi influencée par l'alimentation donc variable, mais globalement plutôt basse. D'après un article de 1990, les insectes n'ont pas la capacité de synthétiser les stérols et sont donc dépendants d'un apport exogène de précurseurs, donc de leur alimentation. Cet élément pourrait présenter un avantage pour certains régimes et on peut imaginer une consommation de certains insectes présentant de faibles teneurs en cholestérol lorsque celui-ci est apporté en quantité minimale dans l'alimentation (Ritter, 1990).

### ***c. Composition des insectes en fibres et glucides***

La proportion de fibres varie de 5,06% pour les Isoptères jusqu'à 13,56% pour les Hémiptères (29% au maximum), ce sont des nutriments mineurs chez les insectes en comparaison avec les protéines et les lipides (Rumpold and Schlüter, 2013).

Les glucides non cellulosiques varient de 4,63% en moyenne pour les Odonates à 22,84% en moyenne pour les Isoptères, ce qui est peu, et comparable aux autres produits animaux. Le ver de farine *T. molitor* est l'une des espèces les plus pauvres en glucides, soit une proportion de 0,01% à 3,86% (Nowak et al., 2016; Rumpold and Schlüter, 2013).

### ***d. Composition des insectes en vitamines et minéraux***

Un autre aspect permettant d'évaluer les qualités nutritionnelles des insectes est leur composition en vitamines et minéraux, éléments trouvés en quantité plus restreintes mais de première importance pour un bon fonctionnement de l'organisme.

Peu de données existent actuellement sur la composition en vitamines des insectes, mais des tendances générales peuvent être notées. Une relative richesse en vitamines B2, B5 et B8 est globale. Les orthoptères et coléoptères ont une quantité de vitamine B9 relativement importante. Il faut noter que 100g d'insectes ne suffisent généralement pas à couvrir les besoins en vitamines A, C, B3 et B1. Les insectes sont globalement une source un peu faible en vitamine E même s'il est difficile de comparer les chiffres aux recommandations étant donné les différentes formes considérées de cet élément. Pour que la consommation d'insectes présente un intérêt en termes

d'apport vitaminique, il faudrait considérer chaque vitamine et sélectionner les insectes selon l'espèce et selon leur alimentation pour avoir l'apport en vitamines souhaité dans tel ou tel type d'alimentation (Rumpold and Schlüter, 2013).

Concernant les minéraux, il existe une grande variabilité selon les espèces, mais le plus souvent 100g d'insectes ne couvrent pas les besoins en minéraux journaliers. Les insectes ont globalement une certaine pauvreté en sodium, ce qui pourrait présenter un intérêt pour les régimes alimentaires avec teneur en sel diminuée (ANSES, 2015; Rumpold and Schlüter, 2013). Les apports en calcium (Ca) et potassium (K) sont limités dans la plupart des espèces, mais le taux de Ca peut être augmenté par l'alimentation (ANSES, 2015). L'apport en fer (Fe) et zinc (Zn) est un facteur primordial pour lutter contre la malnutrition, les carences étant à l'origine d'effets très délétères sur la santé. Sur cet aspect nutritionnel, les 17 espèces d'insectes répertoriées en 2018 par Mwangi et al. ont montré que pour 100g d'aliment, la couverture de ces besoins par rapport aux viandes plus conventionnelles est égale voire meilleure (Mwangi et al., 2018; Zielińska et al., 2015).

## **2. Facteurs influençant la composition des insectes**

Comme évoqué précédemment, il existe des différences interspécifiques concernant la composition nutritionnelle des insectes, ils n'ont pas tous le même potentiel en termes d'apports. Il existe aussi pour une même espèce, des variations intra-spécifiques pouvant être attribuées à différents facteurs durant l'élevage et la transformation.

### ***a. Influence de l'alimentation***

Le contrôle de l'alimentation est un des points essentiels quel que soit le type d'élevage considéré. En effet, elle doit être adaptée à l'espèce animale considérée pour permettre un développement convenable et un produit résultant satisfaisant et il en est de même pour la production d'insectes. La sensibilité des insectes aux variations alimentaires est dépendante de l'espèce : *Blaptica dubia*, la blatte géante d'Argentine, a montré des variations très importantes de sa composition en lien avec

l'alimentation contrairement au grillon domestique et au ver de farine où celles-ci sont plus modérées (Oonincx et al., 2015).

Pour la plupart des espèces étudiées, le contenu protéique de l'insecte n'est que peu influencé par la composition de l'alimentation et notamment l'apport en protéines (Oonincx et al., 2015; Van Broekhoven et al., 2015). Cela suppose une régulation par l'insecte lui-même, qui semble se faire par adaptation de l'excrétion d'acide urique (Van Broekhoven et al., 2015).

Les variations alimentaires affectent de manière plus franche la composition en lipides des insectes. La quantité totale en lipides est diminuée lorsque la qualité nutritionnelle globale de l'alimentation est limitée : l'insecte va devoir puiser dans ses réserves lipidiques et sera donc moins riche à maturité. Le profil en acide gras est très influencé par l'alimentation, notamment une augmentation de la proportion en AGPI entraîne une augmentation de celle de l'insecte qui la consomme (Van Broekhoven et al., 2015). Le rapport oméga-6/omega-3 peut être influencé par l'alimentation pour mieux convenir à l'alimentation humaine : l'ajout de graines de lin (riches en omega-3) à la ration de la fausse teigne (*G. mellonella*) a permis de diminuer le ratio de 4,68 à 0,86 (Francardi et al., 2017). Cependant, le profil ne suit pas nécessairement celui de l'aliment consommé, supposant là aussi une régulation propre à l'insecte. Les insectes nécessitent un apport de cholestérol par l'alimentation car ils ne le synthétisent pas eux-mêmes : la quantité présente dans l'insecte est de ce fait très dépendante de l'alimentation (Ritter, 1990).

La composition en vitamines et minéraux est globalement influencée par l'alimentation des insectes. Chez le criquet migrateur, une étude a montré que sa composition en calcium (Ca), potassium (K), magnésium (Mg), sodium (Na) et rétinol (vitamine A) était significativement affectée par l'alimentation (Oonincx and van der Poel, 2010). La quantité de fer (Fe) et zinc (Zn) est augmentée lors d'une augmentation de la proportion de protéines dans l'alimentation, avec l'existence d'une régulation interne pour le zinc chez certaines espèces (Mwangi et al., 2018). Le rapport calcium/phosphore des insectes est influencé par une augmentation du calcium dans la ration qui permet une augmentation résultante chez l'insecte et donc un rapport plus favorable pour l'alimentation des volailles considérées dans l'étude (Anderson, 2000; Makkar et al., 2014).

### **b. Influence des facteurs environnementaux**

Une étude datant de 1973 s'est intéressée au développement du ver de farine *T. molitor* en fonction de la présence d'eau ou non : si le ver se développe plus efficacement en présence d'eau, sa richesse en lipides est aussi plus importante dans ces conditions (Urs and Hopkins, 1973).

Les études portent principalement sur la variabilité des lipides face aux changements de température dans le milieu de vie. Les insectes semblent y être plus ou moins sensibles selon l'espèce considérée : la proportion en lipides du ver de farine *T. molitor* serait plus sensible à la température ambiante que celle du ver buffalo *A. diaperinus* (Bjørge et al., 2018). Une étude sur le ver de farine s'intéressant à l'effet de trois températures (17°C, 23°C et 28°C) a montré une augmentation significative de la proportion de lipides entre la température la plus basse et les températures plus élevées, mais la dernière augmentation n'a pas montré de différence significative (Adámková et al., 2017). Si l'on s'intéresse plus précisément au profil en acides gras, l'exposition à des températures basses pourrait être à l'origine d'une augmentation du degré d'insaturation des acides gras de la membrane et inversement avec augmentation de température (Van Dooremalen and Ellers, 2010).

### **c. Influence du stade de développement**

Peu d'études se sont intéressées au sujet de l'influence du stade de développement de l'insecte. Une étude de 2010 a noté une différence dans les concentrations en phosphore (P), potassium (K), cuivre (Cu) et fer (Fe) entre l'avant-dernier stade larvaire du criquet migrateur (*L. migratoria*) et le stade adulte de cette même espèce (Oonincx and van der Poel, 2010).

Globalement, les larves ont des teneurs en lipides plus importantes que les insectes adultes, alors qu'au contraire la proportion de fibres semble augmentée chez l'adulte par rapport à la larve (Nowak et al., 2016; Rumpold and Schlüter, 2013).

### **d. Influence des procédures de cuisson et de déshydratation**

Les procédures, notamment de cuisson, appliquées aux insectes avant consommation ne sont pas anodines : la stabilité des nutriments n'est pas certaine lors d'application de certains procédés utilisant notamment de hautes températures ou encore de l'eau. Peu d'études se sont pour l'instant intéressées à ce sujet, car la priorité actuelle est l'élimination des microorganismes plutôt que la conservation des nutriments (qui peuvent s'opposer en termes de traitement appliqué).

Certains principes généraux peuvent permettre de limiter cette « fuite » de nutriments (Mwangi et al., 2018) :

- bouillir dans l'eau salée (jusqu'à environ 1% NaCl),
- limiter le temps de cuisson,
- limiter la température de cuisson utilisée,
- préférer des méthodes à l'origine d'une perte en nutriments moindre (faire mijoter, frire ou rôtir).

Il conviendrait donc de déterminer quelles méthodes sont les plus adéquates pour conserver les bienfaits nutritionnels des insectes, en tenant compte de leur gabarit et de leur pourcentage en eau notamment qui conditionnent leur évolution lors des procédures appliquées.

Plusieurs études semblent cependant montrer que les diverses procédures de cuisson et de séchage n'ont pas d'impact majeur sur la composition en nutriments des insectes étudiés, mais qu'elles pourraient présenter au contraire un avantage sur la digestibilité (Caparros Megido et al., 2018; Fombong et al., 2017). Les lipides sont cependant sensibles à la peroxydation notamment, et certaines procédures (cuisson et déshydratation) appliquées à des huiles issues d'insectes ont montré un effet d'accélération sur la dégradation de ces molécules (Tiencheu et al., 2013).

Une étude d'Osimani et al. en 2017 s'est intéressée à la composition en nutriments d'insectes déshydratés commercialisés en Europe (grillon, ver de farine et criquet) : les valeurs trouvées pour ces insectes sont très proches de celles obtenues pour des insectes crus (teneur en protéines de 47 à 60% et en lipides de 15 à 35%), ce qui fait relativiser une éventuelle détérioration des qualités nutritionnelles de l'insecte lors des process de fabrication (Osimani et al., 2017).

### **3. Perspectives en matière d'alimentation à base d'insectes**

Les insectes ont des bienfaits nutritionnels certains, mais d'autres propriétés, physico-chimiques ou médicinales ont aussi été investiguées dans un contexte d'intégration des insectes à l'alimentation.

#### ***a. Apport en innovation culinaire***

L'intégration des insectes à notre alimentation semble pouvoir se faire principalement par l'utilisation de farines d'insectes intégrées à des préparations. Dans l'esprit de remplacer en partie la viande conventionnelle, des chercheurs se sont intéressés à l'intégration d'un certain pourcentage de farine d'insectes dans des préparations à base de viande et aux conséquences physico-chimiques et organoleptiques de ce mélange. Une étude de 2017 a montré que l'ajout de 10% de farine de grillon à une préparation à base de viande n'a pas d'impact négatif sur les propriétés de cuisson et de texture du mélange (Kim et al., 2017). Les farines de ténébrions et de vers à soie ont montré des changements de certaines propriétés physiques de la préparation, mais ceux-ci ne semblent pas détériorer pour autant leur potentielle acceptabilité dans la consommation (Kim et al., 2015a; Park et al., 2017). L'intérêt principal est d'augmenter la quantité et la qualité des protéines et acides aminés dans de telles préparations, ce qui est déjà marqué avec 10 à 20% de farines d'insectes.

L'étude de Park et al. en 2017 met de plus en évidence l'avantage en termes de tenue de la préparation de viande avec l'ajout de farine de pupes de ver à soie : elle agirait comme liant de manière très comparable à un ajout de transglutaminase, enzyme couramment utilisée pour cet effet (Park et al., 2017).

Les capacités gélifiantes de certaines fractions protéiques des insectes ont aussi été mises en évidence. En effet, cette propriété est dépendante du pH et de la température, et peut être utilisée notamment pour la tenue de glace (bien que ses propriétés varient légèrement de la gélatine du commerce) (Mariod and Fadul, 2015; Yi et al., 2013). Certaines fractions ont aussi des propriétés émulsifiantes, notamment pour le criquet migrateur, pouvoir émulsifiant très proche de celui du blanc d'œuf (Purschke et al., 2018).

## **b. Apport « médicinal » de l'entomophagie**

La chitine, composant majeur de l'exosquelette des arthropodes, ainsi que ses dérivés (chitosane et chitooligosaccharides), sont étudiés pour leurs activités biologiques et notamment leurs effets stimulateur de l'immunité et favorisant d'une flore bénéfique pour l'organisme (van Huis, 2013). Il y aurait aussi d'autres effets sur la santé, notamment un impact bénéfique sur le métabolisme des acides gras et celui des glucides, ainsi que dans la facilitation de la perte de poids (Philibert et al., 2017). Les résultats d'une étude de 2012 sur le chitosane issu de larves de mouche domestique suggèrent que cet élément pourrait être utilisé comme antioxydant naturel pour protéger le corps humain contre la formation de radicaux libres et ainsi retarder le développement de pathologies chroniques (Ai et al., 2012). Un aspect limite l'intérêt de la chitine en alimentation : on ne connaît pas encore très bien la digestibilité de cet élément qui semble très limitée, donc son intérêt reste à étudier plus précisément et à relativiser (Philibert et al., 2017).

Certains extraits (huiles notamment) ou insectes entiers auraient des propriétés diverses sur la protection hépatique, la prévention de l'obésité ou encore le contrôle de l'hyperlipidémie dans des études sur des modèles animaux nourris avec les insectes étudiés (Im et al., 2018; Yoon et al., 2015; Zou et al., 2017). Plus généralement, certains insectes et leurs extraits sont utilisés en médecine traditionnelle, notamment en Asie, où de nombreuses propriétés leurs sont conférées mais non encore clarifiées par des études scientifiques (van Huis, 2016).

---

La consommation d'insectes ne semble pas être à l'origine d'une diminution de la qualité des régimes alimentaires lorsqu'elle remplace en partie les viandes habituelles, et présente au contraire des intérêts sur plusieurs aspects. Retenons qu'il existe cependant des différences majeures entre les différentes espèces considérées et que toutes ne peuvent pas être utilisées de la même manière.

Une étude de 2016 s'intéresse à l'aspect « diététique » général de six espèces d'insectes en comparaison avec les viandes de poulet, de bœuf et de porc : deux indices (Ofcom et NVS, Nutrient Value Score) sont utilisés pour comparer de manière

globale ces différents produits animaux. Le score NVS met en évidence un avantage diététique pour le grillon (*A. domesticus*), le ver de farine (*T. molitor*) et la larve de charançon du palmier (*R. phoenicis*) par rapport à la viande de poulet et de bœuf. Le reste des résultats souligne le fait que les insectes ne présentent pas de désavantages nutritionnels par rapport à la viande, se plaçant ainsi comme alternative de choix pour lutter contre la malnutrition (Payne et al., 2016).

### **C. ÉLEVAGE D'INSECTES ET CONSIDÉRATIONS ÉTHIQUES**

La question du bien-être animal dans le contexte de l'alimentation humaine est aujourd'hui l'un des sujets de préoccupation majeure à tous les niveaux. En effet, la préoccupation de la société pour les animaux d'élevage a beaucoup évolué ces dernières années, et reste grandissante bien que des avancées majeures en matière de protection du bien-être animal aient déjà eu lieu.

Il convient d'abord d'introduire la notion de bien-être animal, qui peut être définie de la façon suivante : « désigne l'état physique et mental d'un animal en relation avec les conditions dans lesquelles il vit et meurt » (code terrestre de l'OIE, Organisation mondiale de la santé animale). Les principes directeurs de l'OIE sur le sujet du bien-être animal se réfèrent aux « cinq libertés fondamentales » qui sont universellement reconnues et énoncées en 1965 (par le « Farm Animal Welfare Council » en Grande-Bretagne) : elles décrivent les droits des animaux lorsqu'ils sont placés sous la responsabilité humaine. Ces libertés fondamentales, indispensables au bien-être d'un animal sont décrites comme suit (OIE, site internet):

- absence de faim, de soif et de malnutrition
- absence de peur et de détresse
- absence de stress physique et thermique
- absence de douleur, de lésion et de maladie
- possibilité pour l'animal d'exprimer les comportements normaux de son espèce.

À différentes échelles dans le monde, on trouve des acteurs qui œuvrent pour que ces grands principes soient respectés au mieux pour les animaux d'élevage, et des cadres législatifs sont définis dans différentes régions du monde.

Concernant les insectes élevés pour l'alimentation ou pour d'autres utilisations, ils ne sont pas encore pris en compte dans la législation européenne en termes de bien-être animal, bien que l'EFSA ait suggéré en 2015 que la prise en compte de leur bien-être devrait être questionnée.

## **1. Les différents aspects du bien-être animal des animaux d'élevage**

Le bien-être en élevage présente trois aspects principaux qui s'intéressent aux différentes étapes de la vie d'un animal d'élevage (ANSES, 2018) :

- l'élevage à proprement parler, c'est-à-dire les conditions de vie chez l'éleveur,
- le transport (de son lieu de naissance à son lieu d'élevage, entre deux lieux d'élevage ou entre son lieu d'élevage et son lieu d'abattage),
- l'abattage (les conditions dans lesquelles il est mis à mort).

### **a. L'élevage**

Concernant l'élevage, de nombreuses lois existent pour encadrer la manière dont doit être logé et nourri un animal d'élevage, conditions adaptées à l'espèce et au type d'élevage considéré. Ces normes reposent sur des études prenant en compte des éléments techniques et de comportement des animaux, afin qu'elles puissent concilier au mieux le bien-être des animaux avec un système de production rentable qu'est l'élevage. Pour le cas des insectes, la limite vient du fait que les pratiques d'élevage d'insectes à grande échelle sont relativement récentes et que la pratique très ancienne de récolte d'insectes dans l'environnement n'implique pas la détention de ces animaux, donc à priori moins de préoccupation d'ordre éthique.

Parmi les points essentiels, la possibilité d'exercer des comportements naturels devrait être garantie par l'élevage d'insectes. C'est un point sensible dans les élevages traditionnels, car l'augmentation des possibilités d'exprimer ces comportements rime souvent avec augmentation de l'espace à consacrer à chaque animal ainsi que l'investissement dans de l'« enrichissement » (exemples : surfaces d'élevage en extérieur ; perchoirs dans les élevages de poules).

Sur ce point, les insectes semblent présenter un avantage considérable dans le sens où certaines espèces ne semblent pas nécessiter beaucoup d'espace et

d'éléments d'enrichissement même à l'état sauvage. Par exemple, le ténébrion meunier (ver de farine, *T.molitor*) se développe naturellement dans un faible espace avec une densité relativement importante d'individus (Pali-Schöll et al., 2018). De plus, un fort éclairage n'est pas nécessaire à sa vie dans les conditions naturelles, conditions qui réunies permettent l'élevage de tels animaux dans de petits contenants empilés, ce qui en termes de surface au sol occupée est très limité. Cependant, il conviendrait de fixer des limites en termes de densité notamment car du cannibalisme est observé chez certaines espèces au-delà d'un certain seuil, et il s'agit d'un phénomène contraire au principe de bien-être. Comme pour tout autre type d'élevage, les situations génératrices de stress en général doivent au maximum être évitées, donc notamment les manipulations et l'exposition à certains stimuli sont à limiter. Étant donnée la grande diversité au sein des insectes, il est important de noter que chaque espèce ou type d'espèce devrait bénéficier de principes de base pour son élevage, lui offrant un cadre de vie adapté à son comportement et à sa physiologie avec des conditions qui lui sont propres (température, humidité, densité, éclairage, etc.) (Parlement Européen, 2017).



*Figure 27 : Aperçu du système d'élevage vertical de vers de farine comestibles de l'entreprise Micronutris.  
Source : Micronutris, site internet.*

Un autre aspect important est l'alimentation, car si l'animal présente des carences ou des excès en différents éléments, son organisme n'est pas en bonne santé et c'est donc une source potentielle de mal-être. Là encore, des recherches sont en cours en ce qui concerne le régime idéal pour les insectes produits, et des pistes intéressantes

existent : certains insectes même élevés pour la consommation humaine pourraient consommer des sous-produits de l'alimentation humaine tout en ayant un régime alimentaire tout-à-fait adapté au fonctionnement normal de leur organisme (Adámková et al., 2017).

L'un des sujets primordiaux, considéré comme base dans toute démarche en faveur du bien-être animal, est le maintien de la bonne santé. Il faut d'abord signaler que celle-ci est dépendante des deux points évoqués précédemment, car un milieu et une alimentation non adaptés conduisent à une mauvaise santé de l'animal en plus de la négligence du bien-être en général. Le cadre sanitaire est très bien fixé pour ce qui concerne les élevages conventionnels, avec un grand nombre de normes à respecter et de contrôles dans les élevages et sur les produits issus d'élevage (exemple : contrôles sanguins réguliers pour certaines pathologies en élevage bovin ; contrôle de la composition du lait en élevage bovin laitier). Le but est double : garantir la santé de l'animal et donc participer à son bien-être, mais aussi garantir la sécurité du consommateur de produits d'élevage. Les mêmes points sont avancés en ce qui concerne l'élevage d'insectes, et si celui-ci se développe en Europe, il y a alors nécessité de mettre en place des mesures contrôlant la santé des insectes d'élevage. Un certain nombre de recherches sont en cours s'intéressant aux pathologies des insectes mais aussi au risque sanitaire lié à leur santé dans un contexte de consommation humaine (ANSES, 2015).

### ***b. Le transport***

C'est un point abordé plus récemment au niveau de l'UE qui s'intéresse notamment au temps de transport des animaux, à la densité d'animaux durant le transport et aux nécessités en termes d'alimentation et d'abreuvement (ANSES, 2018).

Dans le cas des insectes, étant donnée leur durée de vie courte en général et surtout la faisabilité d'un circuit exclusivement interne depuis la naissance jusqu'à l'abattage, la question semble moins se poser en matière de transport. Cependant, l'entreprise française Entomofarm (producteur de farines, huiles et fertilisants à base d'insectes) délocalise sa production de ténébrions chez des éleveurs qui s'occupent des animaux durant leur vie de larve (Entomo farm, site internet). Ainsi, les premières étapes (reproduction, éclosion et premiers stades larvaires) et les dernières (derniers stades larvaires et abattage) sont assurées par la firme, nécessitant donc un transport

à deux reprises durant la vie de l'insecte. On peut cependant penser que l'insecte n'étant pas déplacé en lui-même mais dans son « unité d'élevage » (bac), le stress engendré reste limité aux mouvements et au bruit contrairement aux autres animaux d'élevage qui changent radicalement d'environnement et de confort le temps du transport.

### ***c. L'abattage***

C'est l'un des points cruciaux en élevage conventionnel car sujet à polémiques récemment, suite à la présentation d'images au grand public mettant en évidence certaines pratiques considérées non éthiques en abattoir en France. Le règlement 1099/2009/CE met en place des modes opératoires normalisés (MON) concernant la prise en compte du bien-être animal au moment de l'abattage, ainsi qu'un « Responsable Protection Animale » au sein de l'abattoir en charge de définir et de faire appliquer ces MON. L'un des points fondamentaux du respect du bien-être animal est l'étourdissement préalable à la mise à mort, la directive européenne de 1993 (R 119/93 CE) y faisant référence. Il est donc souhaité que l'animal ne soit plus conscient avant la saignée, ce qui parfois n'est pas le cas dans certaines situations : échec d'étourdissement, dérogation dans le cadre de l'abattage rituel ou non-respect des bonnes pratiques en matière de mise à mort.

Il s'agit donc d'un sujet sensible en élevage conventionnel, qui conviendrait d'être considéré dans le cas particulier des insectes. On peut d'abord s'interroger sur les caractéristiques que doit comporter une « bonne » méthode d'abattage. Pali-Shöll dans sa publication de 2018, propose les trois conditions suivantes : rapidité, pas ou peu de douleur ressentie par l'animal et pas d'utilisation d'euthanasiant (incompatible avec une utilisation alimentaire) (Pali-Schöll et al., 2018).

L'absence de douleur rend quasiment incontournable l'étourdissement préalable, mais il est difficile d'évaluer la notion de conscience de la douleur chez un animal et c'est d'autant plus vrai chez l'insecte qui est plus éloigné de nous qu'une vache notamment. Les méthodes actuellement utilisées pour la mise à mort des insectes sont les suivantes : le refroidissement rapide et l'ébouillantage. L'avantage du refroidissement rapide est qu'il fait d'abord entrer l'insecte dans un état de « sommeil » proche de l'inconscience avant que le froid ne le tue, ce qui s'apparente à une forme d'étourdissement. On note cependant que l'ébouillantage est un processus lui aussi

très rapide, engendrant une possible « douleur » mais d'extrêmement courte durée. De la même manière, certaines entreprises pratiquent le broyage direct d'insectes, processus là aussi très rapide mais possiblement générateur de souffrance. Une autre question doit être posée : une même méthode est-elle idéale pour toutes les espèces d'insectes élevées ? Étant donnée la grande diversité au sein des insectes, cela est peu probable et nécessiterait donc des études approfondies sur les différentes techniques applicables selon les espèces (Pali-Schöll et al., 2018).

La prise en compte du bien-être des insectes d'élevage se situe donc à différentes échelles, mais pose surtout la question de la perception de la douleur et de son aspect conscient ou émotionnel chez ces invertébrés éloignés de l'être humain du point de vue de l'évolution phylogénétique.

## **2. Principe de conscience appliqué aux insectes**

Le fait de savoir si les insectes ont une « conscience » est l'un des éléments ayant un impact certain sur la prise en compte de leur souffrance. Birch et al. en 2017, rappelle les deux formes de conscience pouvant être définies comme suit :

- « broad sentience » ou conscience au sens large : faire l'expérience consciente d'un phénomène,
- « narrow sentience » ou conscience précise : faire l'interprétation consciente d'un phénomène comme attractif ou répulsif.

Il pourrait donc y avoir en théorie une conscience au sens large sans présence d'une conscience précise (mais pas l'inverse), et on peut imaginer que ces deux aspects aient évolué indépendamment au cours de l'évolution des espèces (Birch, 2017).

Le principe de conscience est quoiqu'il arrive difficile à déterminer tant qu'il concerne un organisme autre que le nôtre. On peut uniquement se fier à des suppositions ayant pour base les connaissances en physiologie et les observations du comportement. Il y a d'ailleurs un biais lorsque l'on considère notamment les capacités cognitives d'un animal, car on considérera toujours arbitrairement qu'un animal ayant une grande variété de comportement dits « intelligents » (savoir se servir d'outils par exemple) sera considéré « plus conscient » que la moyenne, alors que ce n'est pas

nécessairement le cas (Pali-Schöll et al., 2018). La taille du cerveau chez l'insecte est certes réduite et comprend un nombre de neurones minimal, mais on ne peut pas dire avec certitude que cela empêche la conscience, il s'agit peut-être simplement d'un mode de perception moins complexe, moins fin et précis qui ne nécessite pas toutes les structures que nous possédons (Birch, 2017).

Devant ces difficultés à déterminer le « ressenti » d'un insecte face aux agressions diverses qu'il pourrait subir, le courant de biocentrisme propose la réflexion suivante : l'insecte mérite d'être traité comme conscient, qu'il le soit ou non, par le simple fait qu'il s'agisse d'une vie animale (Pali-Schöll et al., 2018).

### **3. Évolution des connaissances scientifiques sur une possible conscience et perception de la douleur chez les insectes**

La douleur que nous ressentons a deux composantes principales : d'une part la nociception qui signifie la prise en compte neurologique d'un stimulus douloureux, et d'autre part la perception de cette douleur qui peut être à l'origine à terme d'un apprentissage et nécessite à priori une intégration par des structures centrales (Pali-Schöll et al., 2018).

Dès les années 1980, une équipe de chercheurs s'est intéressée à la perception de la douleur chez les insectes. À première vue, ces animaux ne possèdent pas de système neurologique semblable à ceux des vertébrés et les réponses comportementales des insectes à des stimuli à priori désagréables semblent pouvoir être considérées comme des réponses stéréotypées, peu adaptatives, contrairement à ce qu'on observe chez des mammifères notamment. On peut aussi noter que les insectes possèdent un nombre réduit de neurones en comparaison avec des mammifères ( $10^5$  à  $10^6$  au lieu de  $10^{10}$ ), ce qui laisse difficilement envisager une complexité de fonctionnement semblable (Eisemann et al., 1984).

Si l'on s'intéresse aux données biologiques et anatomiques, on note l'absence de nocicepteurs (récepteur initial de la douleur chez les vertébrés), mais la présence de mécanorécepteurs et de chimiorécepteurs : leur stimulation excessive pourrait conduire à un message spécifique pouvant être à l'origine d'une certaine perception de douleur. Chez les invertébrés, il n'existe à priori pas de voies neurologiques centrales semblables à celles impliquées dans la douleur chez les mammifères, mais

cela n'exclue pas qu'une expérience comparable puisse être produite par des supports biologiques différents. Enfin, des peptides opioïdes endogènes ainsi que leurs sites récepteurs ont été détectés chez certains insectes : ces molécules ayant un rôle analgésique chez les mammifères, on peut alors envisager une certaine perception douloureuse chez l'insecte. Cependant, on retrouve ces molécules chez certains protozoaires et leurs rôles pourraient aussi être de réguler des activités physiologiques et comportementales, sans lien nécessaire avec la douleur (Eisemann et al., 1984).

Si l'on s'intéresse au comportement des insectes dans des situations à priori douloureuses (membre cassé, abdomen perforé, fait d'être consommé par un autre insecte), ceux-ci peuvent poursuivre leur activité sans paraître nécessairement affectés : continuent de s'alimenter, de s'accoupler ou encore s'appuie avec la même pression sur un membre cassé. D'autres comportements se rapprochent plus de ce qu'on associe à de la douleur chez les mammifères : contorsions d'insectes pris au piège ou empoisonnés aux insecticides, émission de sons, de phéromones d'alarme ou de substances repoussantes lorsqu'ils sont victimes d'attaque. Cependant, ce genre de réactions n'indique pas nécessairement de la douleur car elles peuvent être expliquées par des réflexes suscités par certaines stimulations neurologiques sans implication nécessaire de douleur. Enfin, il paraît étonnant du point de vue évolutif de mettre en place un « programme douleur » donc une capacité à souffrir sans qu'il existe une réelle capacité à apporter une réponse adaptative à cette douleur (comme le fait de soutenir un membre cassé par exemple) (Eisemann et al., 1984). Pour les chercheurs, il paraît donc peu probable que les insectes puissent ressentir de la douleur telle que nous l'entendons.

Dans les années 2000, d'autres chercheurs se sont penchés notamment sur les neurotransmetteurs mis en jeu dans le processus de douleur chez les vertébrés qu'ils trouvaient aussi chez les insectes : la sérotonine et la substance P. Chez la drosophile (*Drosophila melanogaster*), des neurones nociceptifs multi-dendritiques atteignant des cibles post-synaptiques contralatérales ont aussi été mises en évidence (Pali-Schöll et al., 2018). Concernant les insectes en général, ils présentent des ganglions nerveux thoraciques et abdominaux dont le rôle reste à déterminer, ainsi que celui du cerveau. Plusieurs études ont montré des réponses comportementales similaires aux vertébrés chez des invertébrés (dont des insectes) lors de l'administration d'analgésiques face à des stimuli désagréables : il y a bien alors une diminution du comportement de défense. Il faut signaler qu'on retrouve chez certains insectes des comportements complexes, issus d'un certain apprentissage, ce qui

suggère un fonctionnement cérébral sans doute plus complexe qu'on le pense (Tomasik, 2017). Les chercheurs notent le manque d'études au sujet des réponses physiologiques chez les insectes (et les invertébrés en général) lorsqu'ils semblent exprimer de la douleur alors que ces modifications sont notables chez un vertébré qui souffre (tachycardie, dilatation des pupilles, changement de rythme respiratoire,...) (Elwood, 2011).

En 2016, une étude de Baron et Klein s'intéresse au cerveau de l'insecte (ganglions cérébraux), à sa structure précise et un certain nombre de similitudes avec notre mésencéphale (ou cerveau moyen) sont notées. Notre conscience évoluée nécessite l'existence du néocortex, mais les chercheurs défendent ici la thèse selon laquelle une forme primitive de conscience pourrait être permise par le mésencéphale seul. Cette partie du cerveau participe notamment à notre conscience de notre position dans l'espace, immobile ou en mouvement. Cette structure pourrait donc permettre à un insecte de vivre une expérience subjective autocentrée, donc une forme primitive de conscience : ils auraient donc conscience d'exister dans un environnement donné (Barron and Klein, 2016).

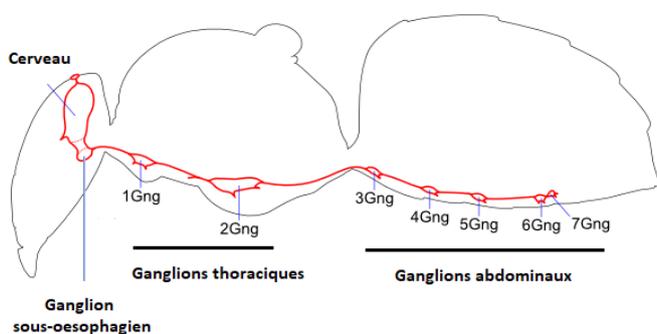


Figure 28 : Schéma simplifié du système nerveux d'un insecte. Source : *The social behaviour of the bees : a comparative study*, C. Duncan Michener.

En conclusion, l'état actuel des connaissances scientifiques ne nous permet pas d'affirmer ni d'infirmer l'existence d'une perception de la douleur chez l'insecte ou d'une réelle conscience en général, bien que des éléments les rendent envisageables.

#### 4. Limites des connaissances actuelles et principe de précaution

Dès les années 1980, certains chercheurs comme VB Wigglesworth ou Eisemann utilisaient des insectes lors de leurs expérimentations, et préconisaient l'anesthésie de ceux-ci avant toute manipulation « douloureuse » ainsi que des

techniques d'élevage et d'abattage « humaines ». Ces chercheurs étaient pourtant quasiment convaincus d'une non-perception de la douleur (telle que nous l'entendons) par ces animaux, mais avec le maintien d'un doute et un principe de respect de la vie animale, ces règles sont globalement appliquées aux insectes utilisés pour la recherche alors qu'aucune législation n'y oblige les chercheurs encore aujourd'hui (Pali-Schöll et al., 2018).

En 2015, l'EFSA a rendu un avis scientifique déclarant que la loi de protection des animaux devrait inclure les insectes au nom du principe de précaution (non pris en compte par la Commission jusqu'à présent). En effet, on ne peut aujourd'hui être certain que les insectes ne souffrent pas notamment parce que des aspects de leur fonctionnement physiologique et comportemental laissent entrevoir certaines possibilités (Pali-Schöll et al., 2018) :

- mise en évidence d'une forme de nociception,
- existence d'opioïdes endogènes,
- capacités plus ou moins développées à éviter les stimuli nocifs,
- proximité structurale du cerveau de l'insecte avec le mésencéphale.

Il paraît donc important de poser des bases réglementaires pour le respect du bien-être animal appliqué aux insectes d'élevage.

## **5. Perspectives lors de l'application du principe de précaution**

En termes économiques, il a été montré pour d'autres animaux d'élevage que la prise en considération du bien-être animal de manière générale présente plutôt des avantages (dans une certaine mesure). En effet, des animaux en bonne santé et nourris avec une alimentation qui correspond à leur physiologie, ont toutes les chances d'être en meilleur état au moment de l'abattage ou bien de produire des œufs ou du lait de bonne qualité. C'est le même principe pour les insectes, chez lesquels on peut observer une augmentation massive de la mortalité lorsque l'alimentation n'est pas adaptée ou encore une apparition de cannibalisme si la densité est trop élevée. Ici encore, des éléments de bien-être animal sont en faveur d'un meilleur rendement économique (Adámková et al., 2017).

Si l'on décide de prendre en compte le bien-être des insectes à grande échelle, se pose la question en ce qui concerne les insecticides ou encore les insectes victimes

collatérales de nos actions du quotidien. La mouvance antispéciste revendique une considération morale pour les insectes dans leur ensemble comme pour toute autre espèce animale. Dans cet esprit, leur élevage seraient donc à l'origine de la fin de vies animales d'autant plus nombreuses (en lien avec le poids de carcasse très faible d'un insecte), ce qui n'est selon cette idée pas plus acceptable que les élevages conventionnels en termes de morale (Pali-Schöll et al., 2018).

Enfin, étant donné les considérations morales que de plus en plus de personnes ont face à la consommation de viande ou de produits animaux en général, l'élevage d'insectes présente-t-il réellement une alternative acceptable aux élevages conventionnels en termes d'éthique ou bien pose-t-il les mêmes questions d'ordre moral ? Ainsi, l'élevage et l'abattage d'insectes sont-ils réellement préférables à ceux des animaux d'élevages conventionnels ? Aujourd'hui, la plupart des élevages d'insectes en Europe appliquent les bases du bien-être pour ces animaux en respectant diverses chartes appliquées au sein d'organisations de producteurs. Il serait alors souhaitable pour éviter les dérives, qu'une législation voit le jour et impose des contrôles sur ce type de mesures. Enfin, des recherches sont nécessaires pour essayer d'adapter au mieux les conditions d'élevage et d'abattage à chaque type d'insecte, selon son gabarit et son fonctionnement physiologique.

## **PARTIE III : FREINS ACTUELS POUR UN DÉVELOPPEMENT DE L'ENTOMOPHAGIE EN EUROPE**

### **A. POTENTIELS RISQUES SANITAIRES ASSOCIÉS À L'ENTOMOPHAGIE**

Le rapport de la FAO paru en 2013 est très clair en ce qui concerne la possibilité de développement d'élevages d'insectes à travers le monde : cela ne pourra se faire qu'à partir de données scientifiques solides évaluant les risques pour la santé humaine d'une telle consommation. L'ANSES (Agence Nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) a donc produit un rapport en 2015 qui pose les grandes lignes des sujets de préoccupation concernant la sécurité sanitaire dans la consommation d'insectes.

Les risques évoqués par l'agence sont les suivants (ANSES, 2015) :

- ➔ Les substances chimiques (venins, facteurs antinutritionnels, médicaments vétérinaires utilisés dans les élevages d'insectes, pesticides ou polluants organiques présents dans l'environnement ou l'alimentation des insectes, etc.)
- ➔ Les agents physiques (parties dures de l'insecte comme le dard, le rostre, etc.)
- ➔ Les allergènes communs à l'ensemble des arthropodes (acariens, crustacés, mollusques)
- ➔ Les parasites, virus, bactéries et leurs toxines ou encore les champignons
- ➔ Les conditions d'élevage et de production, pour lesquelles il conviendrait de définir un encadrement spécifique permettant de garantir la maîtrise des risques sanitaires
- ➔ Les modes de conservation non adaptés, aliments devenant impropres à la consommation

Ces différents aspects seront donc précisés à la lumière des connaissances apportées par des publications scientifiques pour la plupart récentes car la dynamique est née du rapport de la FAO en 2013.

## 1. Risque allergique

C'est l'une des préoccupations majeures, car il a été en effet mis en évidence que ce risque existe et peut être rapproché de l'allergie aux crustacées bien connue. Les allergies aux insectes en général sont étudiées depuis de nombreuses années, mais il s'agit principalement de prise en compte des allergies par inhalation ou par contact, et non d'allergie alimentaire. Parmi les plus étudiées, il y a l'allergie aux cafards ou blattes (bien qu'elles soient aussi consommées), ou encore celle aux acariens bien connue, et globalement un certain nombre de réactions allergiques est rapporté. Parmi les catégories de la population les plus touchées, on trouve notamment les chercheurs utilisant des insectes dans leurs études, et donc souvent exposés par contact ou inhalation d'insectes ou substances issues d'insectes (Stanhope et al., 2015). Le phénomène d'allergie aux insectes se développe aussi dans le secteur des animaux de compagnie : en effet, certains particuliers possèdent des reptiles à leur domicile, parfois dans un contexte d'allergie à d'autres animaux (chien, chat et lapin principalement). Cependant, ces reptiles étant principalement nourris avec des insectes (orthoptères principalement : grillons, criquets, sauterelles), on note des réactions allergiques par inhalation et par contact dans cette population aussi (déjà identifiées chez des éleveurs de tels animaux) (Jensen-Jarolim et al., 2015). Ces allergies non alimentaires ont-elles un lien avec ce qui nous intéresse c'est-à-dire les risques de développer une réaction allergique suite à la consommation d'insectes ? Il n'est pas évident d'en juger à première vue, mais cela nous alerte sur les dangers potentiels du contact rapproché avec ses animaux.

### **a. Les insectes allergisants**

En Europe, les allergies alimentaires concernent 0,1 à 5,7% des enfants et 1 à 3,2% des adultes (de Gier and Verhoeckx, 2018), et parmi les personnes présentant une allergie alimentaire en France, 2% des enfants et 3% des adultes sont allergiques aux crustacées (crevette, crabe, langouste, langoustine, homard)(Dubuisson et al., 2002). Du point de vue phylogénétique, les insectes et les crustacées font partie du même embranchement, celui des arthropodes, ce qui signifie qu'ils ont une certaine proximité en termes de caractéristiques physiologiques et donc potentiellement en ce qui concerne les phénomènes allergiques qu'ils déclenchent.

Des réactions allergiques ont été décrites pour les espèces et catégories d'insectes suivantes (de Gier and Verhoeckx, 2018) :

- *Bombyx mori* (ver à soie, lépidoptère)
- Ténébrions (vers de farine, larves de coléoptères)
- Chenilles (larves de lépidoptères)
- *Bruchus lentis* (coléoptère)
- *Rhynchophorus* (Charançons du palmier, coléoptères)
- Criquets et sauterelles (orthoptères)
- Cicadelles (cicadélidés, hémiptères)
- Abeilles (hyménoptères)
- *Clanis bilineata* (lépidoptère)
- *Dactylopius coccus* (cochenille, hémiptère)

Ce sont pour la plupart des espèces consommées depuis de nombreuses années dans un certain nombre de pays à travers le monde, mais très peu en Europe, alors que c'est là que l'on rapporte le plus de réactions allergiques aux insectes d'après De Gier & Verhoeckx. La raison n'est pas connue, il s'agit peut-être d'un manque d'études dans certaines parties du monde où l'on en consomme plus. Dans cette liste se trouve le seul insecte utilisé de manière autorisée dans l'alimentation humaine en Union Européenne : la cochenille, ou plutôt une espèce de cochenille particulière (*Dactylopius coccus*), à l'origine du colorant alimentaire E120 autrement appelé « carmin » et utilisé dans un grand nombre de produits du commerce (yaourts, jus de fruits, cocktails, etc.). C'est l'acide carminique qui est extrait de ces insectes, une molécule constituée d'un glucose associé à une anthraquinone. Ce n'est pas cette molécule en elle-même mais son association inévitable avec une protéine de l'insecte qui serait à l'origine des réactions observées : une protéine 38-kD a été isolée, probablement en lien avec le métabolisme du phosphate (Dufossé, 2014). Ces faits mènent à penser qu'il est en effet intéressant de comprendre les mécanismes d'allergénicité des insectes afin de les prévenir au mieux.

## ***b. Les manifestations de l'allergie***

La réaction allergique se manifeste de quelques minutes à 6 heures suite à l'ingestion de l'insecte, ce qui rend parfois difficile l'identification de celui-ci comme source du problème. Les symptômes observés peuvent se répartir en trois catégories et sont assez semblables à ceux observés dans le cas d'allergies alimentaires autres : symptômes cutanés (urticaire, prurit, éruptions cutanées, rougeurs, angioedème), symptômes gastro-intestinaux (douleur abdominale, diarrhée, nausées, vomissements) et respiratoires (asthme, dyspnée) (de Gier and Verhoeckx, 2018).

Parmi les manifestations les plus spectaculaires de l'allergie alimentaire, on trouve le choc anaphylactique lors duquel le pronostic vital est engagé à court terme : il s'agit d'une réaction allergique immédiate (après 5 à 20 minutes) et généralisée, avec de nombreux symptômes apparaissant simultanément (respiratoires, cardiaques, cutanés, digestifs) (AFPRAL, site internet). Certaines études rapportent de telles réactions, notamment en Chine où entre 1980 et 2007, 18% des chocs anaphylactiques liés à l'alimentation seraient dus à l'ingestion d'insectes (pays où l'entomophagie est assez répandue ; sauterelles, criquets et vers à soie sont les catégories les plus concernées) (Ji et al., 2009). Cette proportion n'étant pas négligeable il paraît nécessaire de comprendre ce phénomène allergique peu connu ici, avant d'étendre cette production potentiellement dangereuse en Europe.

D'autant plus que les individus présentant des réactions allergiques parfois violentes n'ont pas nécessairement de passé allergique connu, et une personne peut avoir consommé cet insecte pendant des années avant de déclencher l'allergie (ce qui est le cas pour beaucoup de phénomènes allergiques).

## ***c. Allergènes et réactions croisées***

Actuellement, l'OMS reconnaît uniquement, dans la liste des allergènes alimentaires des insectes, l'arginine kinase du ver à soie, les autres concernant les allergies par inhalation de la blatte. Or cet allergène a été retrouvé chez plusieurs espèces d'insectes et d'arthropodes ainsi que d'autres molécules trouvées

fréquemment. Les molécules allergisantes sont le plus souvent des protéines (voire des glycoprotéines), et se répartissent en différentes catégories (Schlüter et al., 2017) :

- protéines musculaires (tropomyosine, myosine, actine, troponine),
- protéines cellulaires (tubuline), protéines circulatoires (hemocyanine, défensine)
- enzymes (arginine kinase, triosephosphate isomerase,  $\alpha$ -amylase, trypsine, phospholipase A, hyaluronidase).

Les plus étudiées, car les plus souvent incriminées dans des réactions allergiques, sont l'arginine-kinase et la tropomyosine. L'arginine-kinase est une enzyme qui participe à l'homéostasie cellulaire car elle catalyse le transfert de phosphate entre ATP et arginine (à noter qu'elle est de la même famille que la créatine-kinase des vertébrés, capable elle aussi de déclencher une réaction allergique). On la retrouve comme facteur d'allergie notamment chez le ver à soie et le ver de farine. La tropomyosine est une protéine musculaire qui participe à la contraction du muscle avec la myosine et l'actine ; elle est aussi présente dans des cellules autres que musculaires et reconnue allergène chez le ver de farine (de Gier and Verhoeckx, 2018).

Pour évaluer la réaction allergique, les scientifiques recherchent des anticorps assez spécifiques du phénomène allergique chez les mammifères : les immunoglobulines E (IgE). Les chercheurs détectent les IgE dirigées vers tel ou tel allergène. Beaucoup d'études se font *in vitro*, et les études *in vivo* concernent quasiment uniquement des animaux et non les êtres humains (de Gier and Verhoeckx, 2018). Les protéines extraites de l'insecte sont isolées puis identifiées à la lumière des connaissances préexistantes pour chacune.

Étant donnée la proximité phylogénétique des insectes avec d'autres arthropodes comme les crustacées et les acariens [Figure 26], les scientifiques sont actuellement en train de mettre en évidence des liens entre les différentes allergies aux arthropodes, que l'on va appeler « réactions croisées ».

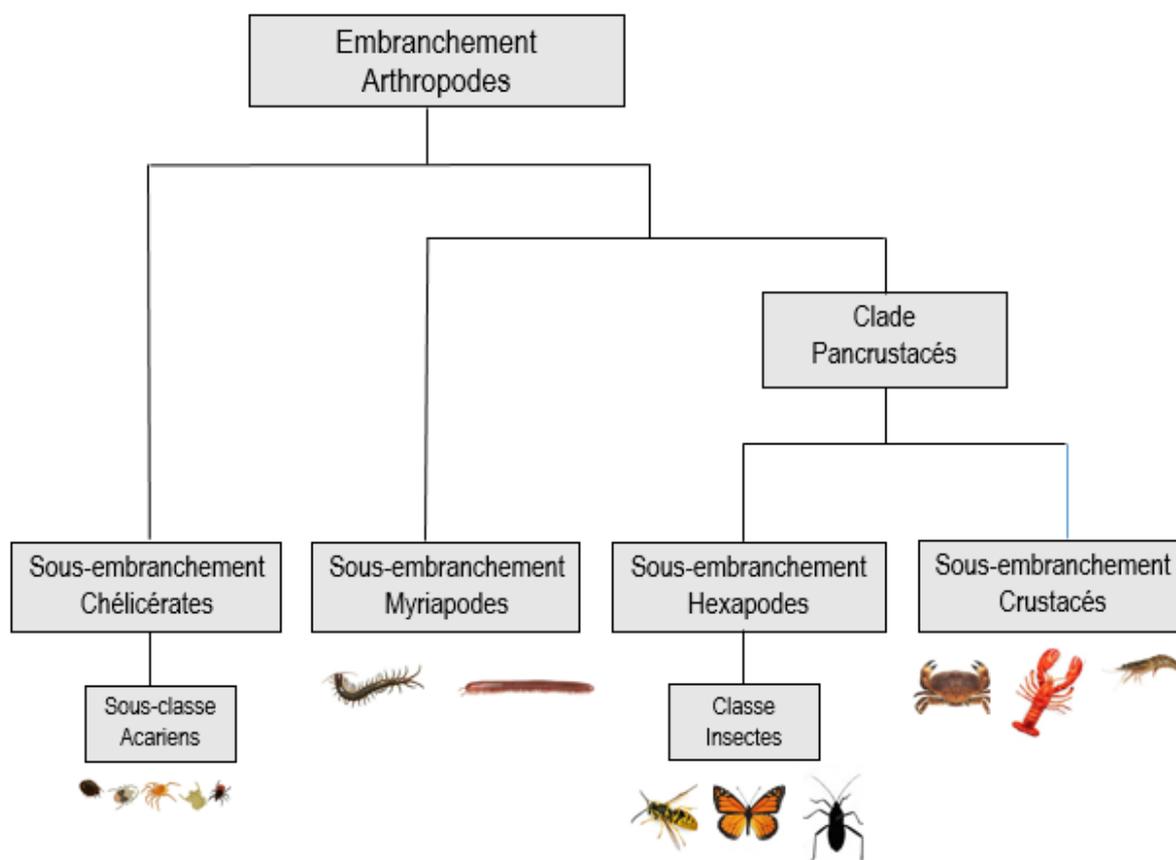


Figure 29 : Représentation simplifiée de l'embranchement Arthropodes.

D'après Verhoeckx et al., 2014.

En effet, les protéines citées précédemment sont pour certaines communes entre les différentes catégories d'arthropodes et leur proximité en termes d'évolution souligne l'importance de rechercher des réactions allergiques similaires. Au cours de ces dernières années, la réactivité croisée avec les crustacées et acariens a été identifiée pour un certain nombre d'espèces d'insectes : ver de farine (3 espèces), grillon, sauterelle, criquet, mouche soldat, mite, termite et blatte (de Gier and Verhoeckx, 2018).

Concernant la tropomyosine par exemple, on a entre 60 et 90% d'homologie entre cette protéine chez la crevette et son homologue chez le ver de farine (Van Broekhoven et al., 2016). Il se trouve que cette protéine semble être un allergène à la fois chez les insectes et les crustacées (notamment les crevettes), et que les personnes présentant une allergie aux crevettes peuvent aussi présenter une allergie aux insectes en rapport avec la tropomyosine. Les réactions croisées avec les acariens semblent quant à elles avoir lieu via d'autres protéines identifiées comme allergéniques dans ces deux catégories d'arthropodes : paramyosine et myosine des vers de farine présentent une homologie importante avec le groupe 11 regroupant des

protéines allergéniques des acariens. L'arginine kinase est aussi à l'origine de réactions croisées, notamment entre des insectes comme le ver à soie (*Bombyx mori*) et la pyrale indienne (*Plodia interpunctella*) et plusieurs crustacées comme des crevettes ou des homards (Binder et al., 2001; Liu et al., 2009).

Un certain nombre d'allergènes ont été identifiés chez les insectes, avec ou sans réactions croisées mises en évidence, mais il reste à déterminer la nature de ses protéines qui n'ont pas toutes été encore étudiées.

Concernant la sensibilisation, il est donc supposé qu'elle puisse se faire pour une protéine d'un arthropode donné lorsque celui-ci est consommé, et qu'elle déclenche la réaction allergique lors de la consommation d'un autre arthropode pour une protéine similaire. Il est aussi supposé qu'une sensibilisation puisse se faire par contact ou inhalation et non uniquement par ingestion.

#### ***d. Effet des différents traitements appliqués aux insectes sur leur allergénicité***

##### ***i. Allergénicité des insectes après cuisson***

Comme les insectes sont appelés à être consommés après différents traitements thermiques plutôt que crus, il est intéressant de voir quelle influence peut avoir la cuisson sur les capacités allergisantes de ces animaux.

Les effets de la chaleur sur l'allergénicité sont variables : elle peut augmenter, diminuer ou bien rester la même selon les études et les molécules étudiées. Le plus souvent, ces études sont faites *in vitro* par immunoblotting (méthode utilisant la fixation d'un anticorps marqué sur l'allergène correspondant) et évaluent donc la capacité de fixation des IgE sur l'allergène après qu'il ait subi un traitement thermique. Pour avoir une idée de l'influence de la cuisson sur les symptômes exprimés, il faudrait des études *in vivo* chez l'homme car une diminution de la capacité de liaison entre IgE et allergène n'est pas toujours corrélée à une diminution de l'intensité des symptômes (de Gier and Verhoeckx, 2018). C'est le cas de l'étude menée par Broeckman et al en 2015, qui utilisent des tests cutanés sur des patients allergiques en plus des tests *in vitro* (Broekman et al., 2015).

Les recherches actuelles ont montré que la capacité des allergènes suivants à fixer les IgE n'est pas diminuée par la cuisson :

- Tropomyosine du ver de farine (*T. molitor*)
- Arginine Kinase du ver de farine (*T. molitor*)
- Une glycoprotéine 27-kD du ver à soie (*B. mori*)
- Pyruvate kinase et GAPDH du criquet de Bombay (*Nomadacris succincta*)

Cependant, d'autres résultats des études sur la température (cités par De Gier et al.) sont contradictoires, sans doute en lien avec différentes capacités de solubilité des protéines selon l'élément à partir duquel elles sont recherchées (de Gier and Verhoeckx, 2018).

Concernant la réactivité croisée, une étude de 2016 menée par Van Broeckoven et al. montre une diminution de celle-ci suite à différents procédés thermiques appliqués à trois espèces de vers de farine (*Tenebrio molitor*, *Zophobas morio* et *Alphitobius diaperinus*).

## ii. L'hydrolyse

Les protéines des insectes sont aussi appelées à être utilisées sous forme de peptides (portions de protéines), donc après hydrolyse, pour leurs propriétés supposées d'antioxydants et antidiabétiques notamment. Dans ce cadre, il convient de s'intéresser aux effets d'un tel processus sur l'allergénicité des molécules obtenues car c'est un risque encouru pour le consommateur. Une étude de 2018 s'est intéressée aux effets de l'hydrolyse sur les différentes caractéristiques de la tropomyosine, et notamment son allergénicité, chez le grillon tropical (*Gryllodes sigillatus*) : en utilisant le sérum de personnes allergiques aux crevettes, on a une réactivité croisée marquée pour la tropomyosine non hydrolysée et hydrolysée de 15 à 50%, mais cette réactivité est nulle pour la tropomyosine entre 60 et 85% d'hydrolyse. L'hydrolyse de la tropomyosine de grillon a donc pour effet de diminuer son allergénicité lorsqu'elle est importante, propriété qui pourrait être exploitée pour l'utilisation de cet insecte dans un contexte d'allergie (Hall et al., 2018).

### iii. La digestion

Lors du passage dans le tube digestif de l'homme, les protéines sont soumises à un certain nombre d'agents : environnement acide, pepsines, peptidases, protéases et mélanges de surfactants. Elles peuvent donc être altérées ou non, et il a été montré que même de petits peptides peuvent encore porter l'allergénicité de la protéine de départ (de Gier and Verhoeckx, 2018).

Les digestions *in vitro* des protéines allergènes montrent des altérations de liaison des IgE variables selon la nature de la protéine et l'état initial de l'insecte. L'étude de Van Broeckoven et al. en 2016, s'intéresse notamment à la tropomyosine de trois espèces de vers de farine (*T.molitor*, *Z.morio* et *A. diaperinus*) et à son allergénicité après digestion : il montre ainsi un maintien de l'allergénicité (chez des sujets allergiques aux crevettes) lors de la digestion de l'insecte cru mais une diminution significative lorsque celui-ci est bouilli avant le processus de digestion (Van Broekhoven et al., 2016). Pour ce qui est de la réaction croisée avec les personnes allergiques aux acariens, elle est très diminuée voir absente après digestion *in vitro* (Van Broekhoven et al., 2016).

Ces tests devront être confirmés *in vivo* chez l'homme étant donné que cela n'a été fait jusqu'à présent que chez la souris et le rat.

L'allergie aux insectes est un processus qui n'est pas anodin et non anecdotique à prendre en considération dans le développement de l'entomophagie. Le public devrait être renseigné sur ce risque et les liens avec les allergies aux crustacées et aux acariens, ainsi que la possibilité de développer une allergie à une espèce d'insecte particulière et non à d'autres. Enfin, l'identification de procédures appliquées aux insectes limitant la présence des allergènes permettrait de comprendre comment limiter ce risque pour la population.

## **2. Risques infectieux**

C'est l'un des aspects les plus étudiés actuellement, car peu d'études existaient sur le sujet jusqu'à la publication de l'avis de l'ANSES en 2015. En effet, l'agence précise que les insectes sont actuellement commercialisés et consommés en Europe

alors que les connaissances en matière de risques microbiologiques sont très limités en comparaison avec d'autres produits d'origine animale (ANSES, 2015). On peut distinguer différents aspects de ce risque : parasitaire, bactérien, viral, fongique, lié aux prions.

Il est intéressant de connaître la flore microbienne et fongique ainsi que les parasites que présentent ces organismes afin d'identifier leur éventuel rôle pathogène pour l'homme. Différentes procédures permettent de limiter le risque lié à la consommation d'insectes, ce qui demande d'être approfondi afin de gérer au mieux les risques et d'informer les producteurs et les consommateurs sur les bonnes pratiques à adopter.

### **a. Risque parasitaire**

Les insectes peuvent être porteurs et vecteurs de parasites, notamment lorsqu'ils ont le statut d'hôte intermédiaire dans un cycle parasitaire. Dans la littérature scientifique, la plupart des informations disponibles sur ce risque concernent des régions non-européennes (en Asie principalement) et s'intéressent à des insectes collectés dans la nature, ce qui semble plus favorable au maintien d'un cycle parasitaire qu'en élevage contrôlé (EFSA Scientific Committee, 2015).

Plusieurs types de parasitoses en relation avec la consommation d'insectes ont été décrits :

- Les parasitoses à cercaires et métacercaires, via des insectes aquatiques ou vivants aux abords de l'eau, dont certaines espèces d'oiseaux et de poissons peuvent être des réservoirs hôtes. Ces trématodes appartiennent principalement aux familles des lecithodendridés et des plagiorchidés et sont mis en cause dans un cadre où la consommation des insectes est traditionnelle (Chai et al., 2009).
- La maladie de Chagas est une maladie parasitaire qui sévit dans les régions rurales d'Amérique du Sud et centrale et fait des milliers de morts chaque année. Elle est provoquée par *Trypanosoma cruzi*, transmis par des réduves (punaises hématophage, sous-famille des *Triatominae*) par piqûre mais aussi

par ingestion accidentelle de déjections (aliments contaminés) ou de l'insecte lui-même. Certains mammifères semblent pouvoir constituer des réservoirs de ce parasite (Pereira et al., 2010).

- Certaines parasitoses sont dues à des nématodes, notamment *Gongylomena pulchrum*, appartenant à la superfamille des *Spiruroidea* : cela se produit lors de la consommation de leurs hôtes intermédiaires crus, qui sont des coléoptères et des blattoptères (ANSES, 2015).
- Le trématode *Dicrocoelium dendriticum* est un autre parasite qui affecte l'homme lors de la consommation de fourmis qui contiennent le parasite au stade métacercaire (EFSA Scientific Committee, 2015).
- Les myiases intestinales sont possibles chez l'homme lors d'ingestion accidentelle d'œufs ou de larves de diptères, mouche domestique principalement mais aussi d'autres espèces comme la mouche soldat *Hermetia illucens* aujourd'hui utilisée en alimentation animale (Sehgal et al., 2002).
- Un certain nombre de protozoaires peuvent être transmis à l'homme par l'intermédiaire d'insectes vivants à proximité, principalement certaines mouches et certaines blattes. Des cas ont été décrits pour les protozoaires suivants : *Sarcocystis spp.*, *Toxoplasma gondii*, *Isospora spp.*, *Giardia spp.*, *Entamoeba histolytica/dispar*, *Endolimax nana*, et *Cryptosporidium parvum*. De mauvaises conditions de salubrité favorisent ce type de transmission, lorsque les insectes ont accès à des déjections notamment et qu'il leur est possible de contaminer l'eau ou des denrées alimentaires (Graczyk et al., 2005).

Les parasitoses actuellement décrites sont causées par la consommation le plus souvent non intentionnelle d'insectes crus sauvages. Cela doit nous alerter sur les risques parasitaires liés à la consommation d'insectes, mais reste à relativiser dans le cadre d'un élevage avec contrôle sanitaire. Une meilleure connaissance des relations parasites/insectes permettrait d'identifier de bonnes pratiques d'élevage dans le but de limiter les risques de contamination, et une vermifugation peut être envisagée. La plupart des insectes aujourd'hui consommés subissent un traitement thermique qui devrait permettre une élimination des parasites. Cependant il existe des méthodes alternatives comme la lyophilisation ou la simple congélation dont l'efficacité est à

évaluer. De plus, des seuils de couple température/temps restent à fixer pour les techniques de cuisson (ANSES, 2015; EFSA Scientific Committee, 2015).

Il n'existe actuellement aucune donnée sur des transmissions de parasites par des insectes élevés et consommés par l'homme après transformation.

### ***b. Risque bactérien***

Contrairement aux autres animaux d'élevage, les insectes sont couramment consommés en entier, ce qui a des implications microbiologiques non négligeables. En effet, une grande proportion des bactéries d'un organisme se trouvent d'une part à la surface de celui-ci, mais principalement dans son tube digestif, qui est conservé pour la consommation d'insectes (Schlüter et al., 2017).

Dans la nature, les insectes sont à l'origine de transmission d'un certain nombre de maladies aux êtres humains et aux animaux, ce qui nous alerte sur les risques éventuels liés à leur consommation et donc sur les bonnes pratiques à adopter pour limiter voire éliminer les risques (séchage, cuisson, conservation,...).

#### **i. Population bactérienne des insectes crus**

L'entomophagie en Europe se fait principalement sous forme d'insectes entiers ou sous forme de poudre, mais quasiment toujours après transformation (cuisson et séchage le plus souvent). Ce n'est pas le cas partout dans le monde où ils sont parfois consommés crus ou très peu cuits. Les chercheurs se sont intéressés au microbiote des insectes avant que ne leur soit appliqué un certain nombre de procédures de transformation, car il est relativement facile de s'en procurer notamment en Belgique (marchés, animaleries) (Caparros Megido et al., 2017).

Les pays autorisant la consommation d'insectes en Europe (Belgique et Pays-Bas), recommandent d'utiliser comme seuils pour les comptages de bactéries, ceux utilisés pour les viandes hachées (Caparros Megido et al., 2018). Au cours des dernières années, les chercheurs se sont donc basés sur ces seuils afin d'évaluer les risques liés à la consommation d'insectes.

L'un des premiers éléments d'importance à noter est l'absence de certains pathogènes majeurs dans les insectes même crus : *Salmonella spp*, *Listeria*

*monocytogenes*, et *E.Coli* (Grabowski and Klein, 2017a; Vandeweyer et al., 2017a; Wynants et al., 2018).

En ce qui concerne le comptage total de micro-organismes aérobies, la limite fixée par la réglementation en vigueur pour la viande hachée est dépassée par les insectes dans la totalité des études : les valeurs se trouvent entre 6,5 et 9 log ufc (= unité formant colonie)/g d'insectes, avec une limite supérieure de 5,7 à 6,7 log ufc/g dans la législation (Grabowski and Klein, 2017a; Klunder et al., 2012; Stoops et al., 2016; Vandeweyer et al., 2017a; Wynants et al., 2018). Il s'agit uniquement d'un indice quantitatif et ne donne pas d'information sur les dangers réels, mais plus le nombre de micro-organismes présents est important, plus on augmente les risques concernant la présence éventuelle de bactéries détériorant le produit ou dangereuses pour la santé. Les insectes sous forme de farines ont montré des comptages plus élevés que les insectes entiers (Vandeweyer et al., 2017a).

Lorsqu'on s'intéresse aux différentes bactéries retrouvées chez les insectes, on note une grande variabilité mais aussi des similitudes, notamment au sein d'une même espèce ou d'un même groupe d'espèces. Le groupe des entérobactéries est présent en proportion importante, ainsi que les endospores bactériennes, deux éléments contaminant habituellement les produits et dont certaines espèces présentent des dangers pour la santé humaine (bactéries du genre *Cronobacter* notamment) (Klunder et al., 2012; Vandeweyer et al., 2017b). Lorsqu'on considère les grands regroupements de bactéries (embranchements), on voit notamment que les grillons sont plutôt colonisés par des Firmicutes (bactéries Gram+, dont font partie les genres *Clostridia*, *Bacillus* et *Listeria*) alors que les vers de farine préférentiellement par des Protéobacteria (bactéries Gram- dont notamment les entérobactéries) (Stoops et al., 2016; Vandeweyer et al., 2017b; Wynants et al., 2017). Certains taxons identifiés chez le ver de farine, comme le genre *Erwinia* sont par exemple des phytopathogènes donc à priori sans danger pour l'homme, alors que d'autres comme *Spiroplasma* peuvent être entomopathogènes mais aussi pathogènes pour l'homme (Vandeweyer et al., 2017b). Des bactéries du genre *Pseudomonas* sont aussi retrouvées et peuvent participer à la dégradation des produits.

Le développement des bactéries est permis par des conditions adaptées qu'elles trouvent chez l'insecte frais : un pH autour de la neutralité, une température adaptée (25°C à 30°C) et une quantité d'eau libre suffisante. Ces paramètres varient en fonction des espèces considérées et des conditions d'élevage, ce qui peut expliquer en partie les différences entre espèces (Vandeweyer et al.,

2017a; Wynants et al., 2018). La diversité de taxons identifiés semble aussi variable selon l'espèce d'insecte : une étude de 2016 en trouve 50 différents chez le ver de farine contre seulement 31 pour le criquet migrateur (*Locusta migratoria*).

Aucun danger bactérien majeur connu n'a été identifié pour la consommation d'insectes crus, mais la quantité importante de bactéries et la présence de certains taxons impliquent de s'intéresser plus précisément aux facteurs influençant la présence de bactéries en élevage et aux procédures permettant de limiter leur développement lors de la transformation.

## ii. Influence des pratiques d'élevage

En 2017, Van de Weyer et al. se sont intéressés aux différences microbiologiques entre insectes provenant de différents élevages, pour plusieurs espèces (grillons et vers de farine) et plusieurs types d'élevage (pour la consommation humaine ou animale). L'une des premières conclusions de cette étude est l'absence d'un facteur « élevage » qui conditionnerait la contamination bactérienne : il y a autant de variation entre les lots d'un même élevage qu'entre lots d'élevages différents (Vandeweyer et al., 2017a). On note cependant une variabilité moins importante entre élevages de grillons qu'entre élevages de vers de farine.

Comme évoqué précédemment, les types de bactéries trouvées chez les insectes sont variables en fonction des espèces. On attribue cela en partie à la génétique, mais il faut aussi prendre en compte l'alimentation et le substrat d'élevage qui sont à l'origine d'une part non négligeable du microbiote de l'insecte : on trouve en effet un grand nombre de taxons communs entre l'aliment distribué et l'insecte en lui-même (Wynants et al., 2018). Les céréales distribuées aux vers de farine contiennent une proportion importante de bactéries du type Proteobacteria alors que les légumes apportant l'humidité sont principalement colonisés par des bactéries type Firmicutes. Au contraire, les bactéries du type Entomoplasmes ne sont retrouvées que chez l'insecte et non dans son environnement (Osimani et al., 2018a).

Concernant la diversité microbienne, on note qu'elle diminue en moyenne au cours de l'élevage chez les grillons et les ténébrions : passe de 37 à 22 taxons différents en fin d'élevage (Wynants et al., 2018).

Chez les insectes, le tube digestif est conservé pour la consommation bien que celui-ci présente une source de bactéries importante. Dans le but de limiter cette population bactérienne avant transformation, les insectes sont le plus souvent soumis à un jeûne de quelques heures à quelques jours avant leur abattage, afin qu'ils évacuent dans leurs déjections une certaine proportion des bactéries. Un rinçage à l'eau froide est parfois pratiqué dans un second temps, toujours dans l'idée d'éliminer une part du microbiote. Deux études récentes s'intéressent à l'efficacité de telles procédures dans la décontamination des vers de farine *T. molitor* et *A. diaperinus* : il n'y a aucune différence significative dans les comptages entre les insectes n'ayant pas jeûné et ceux ayant jeûné 24h ou 48h, et le rinçage n'apporte pas de diminution lui non plus (Wynants et al., 2017, 2018). Le seul paramètre qui semble évoluer est la diversité bactérienne : on passe de 22 taxons au moment de la récolte à 15 après jeûne de 24h pour *A. diaperinus* (Wynants et al., 2018).

### iii. Insectes du commerce et efficacité des procédés

Les bactéries peuvent se trouver sous deux formes : forme végétative et forme sporulée. La forme végétative est la forme active de la bactérie, mais aussi une forme fragile, sensible à la chaleur notamment. La forme sporulée quant à elle est un état d'attente mais aussi une forme de résistance, notamment à la chaleur et à la dessiccation. Ces différents aspects de la colonisation bactérienne doivent donc être pris en compte.

#### a) *Risque bactérien des insectes commercialisés*

Dans le commerce, il est parfois difficile de savoir quels traitements ont subi les insectes avant l'achat. En Europe, il s'agit le plus souvent de procédures assez conventionnelles présentant au minimum une étape de cuisson et une étape de séchage qui en général limitent largement les risques pour la santé humaine. Des chercheurs se sont cependant intéressés aux populations bactériennes présentes chez des insectes qu'il est facile de se procurer lorsqu'on habite en Belgique et aux Pays-Bas notamment. En 2016, Grabowski et al. étudient 38 échantillons d'insectes d'espèces diverses ayant subi différents traitements avant commercialisation. En accord avec leurs analyses des populations bactériennes, ils proposent de diviser les

produits d'insectes évalués selon deux catégories de risque (Grabowski and Klein, 2017b) :

- Classe I : insectes déshydratés et poudre d'insectes déshydratés (sans cuisson préalable dans ce cas précis),
- Classe II : insectes frits et insectes cuits.

Pour les produits de la classe I, pour lesquels seule une étape de séchage est rapportée, on retrouve des bactéries en plus grand nombre ainsi que des espèces bactériennes pouvant être pathogènes pour l'homme, ce qui n'est pas le cas pour les produits frits ou cuits. Quel que soit le groupe considéré, les bactéries pathogènes suivantes ne sont cependant jamais retrouvées : *L. monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella spp*, et *E. coli*. La mise en place de telles catégories permettrait de distinguer notamment quels produits peuvent être consommés tels quels suite à leur achat (produits de classe II) et ceux qui nécessitent une étape de cuisson supplémentaire pour plus de sécurité (Grabowski and Klein, 2017b).

L'espèce bactérienne *Bacillus cereus*, et plus généralement le genre *Bacillus* intéresse particulièrement les chercheurs car c'est une bactérie qui sporule (et présente donc une certaine forme de résistance) et qui peut être pathogène dans certaines conditions. Plusieurs études rapportent la présence d'espèces du genre *Bacillus* dans des insectes commercialisés (Garofalo et al., 2017; Osimani et al., 2017, 2018b), mais une seule de l'espèce *B. cereus* dans des poudres de grillons (Osimani et al., 2017). D'autres genres bactériens comme *Listeria*, *Clostridium*, *Staphylococcus* ou encore *Spiroplasma* sont trouvés dans certains insectes commercialisés, ce qui mérite une attention particulière quant au potentiel risque que présentent certaines espèces (Garofalo et al., 2017).

Le risque lors de consommation d'insectes peut être augmenté lorsque ceux-ci sont produits hors Union Européenne car la traçabilité est encore moins facile et les procédures appliquées ne permettent pas toujours de limiter la population bactérienne : il s'agit notamment des insectes fumés en provenance d'Afrique qu'il est possible de trouver sur certains marchés en Europe (Caparros Megido et al., 2017). En 2018, Osimani et al. se sont intéressés à des insectes produits en Thaïlande, espèces plus « exotiques » et très peu étudiées dans le cadre de l'élevage d'insectes (fourmi noire, grillon-taupe,...). Les insectes sont dans ce cas bouillis, puis séchés et enfin salés. Ils ont démontrés l'absence de certaines bactéries et toxines bactériennes pathogènes : *Coxiella burnetii* (responsable de la fièvre Q), Shiga-toxine

produites par certains *E.Coli* (responsable de colites hémorragiques et syndrome hémolytique) et *Pseudomonas aeruginosa* (responsable de perturbations digestives) (Osimani et al., 2018b). Les caractéristiques microbiologiques sont par ailleurs, dans ce cas, similaires aux insectes cuits produits en Europe.

Le problème actuel est principalement le flou qui concerne les procédés utilisés en élevage et destinés à limiter la présence bactérienne dans les produits. C'est pourquoi différentes études ont cherché à évaluer l'efficacité d'un certain nombre de procédures sur les diverses populations bactériennes.

#### *b) Efficacité des procédés sur la diminution du risque bactérien*

Le procédé le plus classique pour limiter la population bactérienne est l'application de températures élevées : en effet, la cuisson permet le plus souvent de faire passer la population bactérienne en-dessous des valeurs seuils préconisées pour les viandes hachées ((EC)1441/2007, 2007). Cependant, cela dépend des types bactériens, des conditions de cuisson et de l'espèce d'insecte considérée.

- La cuisson dans l'eau bouillante pendant une courte durée a été largement étudiée ces dernières années, s'intéressant à plusieurs insectes fréquemment consommés en Europe et plusieurs temps de cuisson (Caparros Megido et al., 2018; Rumpold et al., 2014; Vandeweyer et al., 2017c; Wynants et al., 2018). Il a été montré que même sur des temps courts entre 10 secondes et 1 minute, on obtient une nette diminution de la population microbienne totale des insectes étudiés (Caparros Megido et al., 2018; Vandeweyer et al., 2017c). Néanmoins, il convient de se poser la question de l'application d'un temps de cuisson spécifique à une espèce, un groupe d'espèces ou du moins à une taille d'insecte : un ver de farine comme *T. molitor* mettra peu de temps à être cuit à cœur par rapport aux chenilles parfois volumineuses de certains lépidoptères (Caparros Megido et al., 2017).
- La cuisson sous vide permet une diminution de la population bactérienne aussi efficace qu'avec la cuisson à l'eau pour le ver de farine : il s'agit de plonger dans l'eau chaude à 75°C pendant 1 heure les insectes préalablement placés sous film plastique (Caparros Megido et al., 2018).

- La cuisson au four est une autre technique employée : elle permet d'éliminer une grande proportion des bactéries lorsqu'elle est effectuée à une température suffisante durant un temps assez long. En-dessous de 90°C, la cuisson des insectes testés est insuffisante pour diminuer convenablement la population bactérienne (Caparros Megido et al., 2018; Rumpold et al., 2014), et à cette température l'efficacité est obtenue à partir de 10 minutes de cuisson pour le ver de farine (Rumpold et al., 2014).
- Une cuisson à la poêle est aussi envisagée par Caparros et al. dans leur étude de 2018 : si les ténébrions sont cuits pendant une minute à la poêle avec 15 ml d'huile d'olive, le comptage bactérien total passe en-dessous du seuil autorisé. La diminution est cependant moins efficace qu'avec les cuissons à l'eau et sous vide qui sont dans ce cas comparées (Caparros Megido et al., 2018).
- La stérilisation pour la conservation des insectes a été jusqu'alors peu étudiée, alors qu'elle est reconnue comme efficace pour la diminution des bactéries végétatives, mais aussi des formes sporulées. La stérilisation à 120°C pendant 15 minutes de vers de farine et de grillons domestiques a montré une diminution suffisante du comptage de bactéries total (présence d'endospores non étudiée ici) (Caparros Megido et al., 2017).

La cuisson semble aujourd'hui être une étape essentielle avant de pouvoir consommer des insectes, mais son efficacité est imparfaite, notamment parce qu'elle ne permet pas de diminuer de manière significative la quantité d'endospores bactériennes dans les études considérées.

La déshydratation est une autre technique parfois utilisée seule ou en association avec des techniques de cuisson notamment. L'intérêt est ici de limiter la quantité d'eau disponible et donc utilisable par les bactéries pour se développer. En ce qui concerne son pouvoir potentiel de diminution du total de bactéries, l'efficacité est très limitée et cette procédure seule ne permet en général pas de passer en-dessous des seuils fixés par la législation européenne (Grabowski and Klein, 2017a; Rumpold et al., 2014; Vandeweyer et al., 2017c). Le séchage associé à une cuisson préalable permet quant à lui un produit final décontaminé en grande partie grâce à l'étape de cuisson, et qui présente un intérêt pour la conservation (Grabowski and Klein, 2017a; Vandeweyer et al., 2017c). Les méthodes de fumage et de séchage traditionnel au soleil, présentent

un risque de contaminations secondaires très important et ne sont donc pas recommandées (Caparros Megido et al., 2017).

La tyndallisation associe des étapes de cuisson et de déshydratation à différentes températures, et présente un certain avantage pour la destruction des spores bactériennes notamment (permet leur germination pour les détruire sous forme végétative). Un procédé semblable a été testé sur deux espèces d'insectes, *Zophobas atratus* (ver de farine géant) et *Gryllus bimaculatus* (grillon provençal) et a montré une efficacité pour la diminution des différents comptages bactériens (effet sur les spores non mesuré) (Grabowski and Klein, 2017a)

D'autres techniques sont envisagées dans plusieurs études, avec des efficacités variables :

- La lyophilisation est une procédure de dessiccation qui permet de faire passer l'eau directement d'un état solide (produit congelé) à un état gazeux (sublimation). Les insectes lyophilisés analysés dans une étude de 2017 montrent des comptages compatibles avec la consommation, mais les chercheurs indiquent qu'une réhydratation du produit pourrait conduire à une augmentation des comptages et une étape supplémentaire de cuisson est donc préconisée (Caparros Megido et al., 2017).
- La fermentation lactique permettrait une diminution importante des entérobactéries mais pas des endospores. L'avantage des procédures d'acidification est la conservation des produits notamment dans des contextes d'impossibilité de stockage au frais, car ces conditions de pH ne sont pas favorables au développement des spores bactériennes. Cette procédure mérite donc d'être approfondie (Klunder et al., 2012).
- La stérilisation thermique à haute pression présente aussi un potentiel de limitation des comptages bactériens, mais les niveaux de température et de pression utilisés doivent être précisés pour s'adapter au cas des insectes (Rumpold et al., 2014).

- L'utilisation de générateur de plasma non thermique est aussi évoquée, mais ne permet qu'une diminution significative de la flore de surface et non de la flore totale dans l'étude considérée (Rumpold et al., 2014).

Ces techniques peuvent présenter des avantages mais nécessitent des études plus approfondies pour déterminer les conditions dans lesquelles elles peuvent présenter un intérêt en termes de sécurité alimentaire.

La conservation est aussi un aspect à considérer dans le cadre d'une augmentation de la production d'insectes en Europe. Certains procédés permettent de garantir plus ou moins longtemps une stabilité microbiologique du produit, ce qui est facilité dans un premier temps par une bonne réduction initiale du comptage bactérien, donc par un processus de cuisson adapté. La réfrigération à 4°C permet une conservation au moins sur 6 jours des insectes uniquement blanchis (Vandeweyer et al., 2017c), voire deux semaines selon les études (Klunder et al., 2012). La congélation permet de maintenir le produit stable au moins six mois pour le grillon *Gryllodes sigillatus* (Vandeweyer et al., 2018). Si ces insectes bouillis sont maintenus à température ambiante, leur dégradation est par contre rapide, car la quantité d'eau disponible et l'environnement sont alors favorables au développement des bactéries (Klunder et al., 2012). Pour une meilleure conservation, une étape de séchage en plus de la cuisson est alors préconisée, permettant une stabilité des produits à température ambiante pendant au minimum 6 mois (Vandeweyer et al., 2018). Citée précédemment, la fermentation lactique permettrait une conservation pendant un certain temps des produits car elle peut maintenir des conditions de pH défavorables au développement des bactéries (Klunder et al., 2012).

Les procédés de cuisson sont globalement efficaces pour éliminer les formes végétatives notamment des entérobactéries, et la limite réside donc dans la présence d'endospores plus difficiles à éliminer.

#### iv. Bilan et perspectives

Certains chercheurs suggèrent la mise en place d'une certification à l'international pour les produits à base d'insectes et d'une législation sur les procédés spécifiques à appliquer pour chaque espèce d'insecte consommée, afin d'en garantir la sécurité de consommation (Caparros Megido et al., 2017; Grabowski and Klein, 2017a). Certaines

techniques d'identification des bactéries présentent des limites, ne permettant pas toujours une sensibilité suffisante et une identification précise des espèces : la PCR en temps réel (réaction en chaîne par polymérase de manière quantitative) semble être la technique la plus adaptée pour une évaluation complète du risque bactérien (Osimani et al., 2018b, 2018a). L'application de certaines procédures de cuisson est primordiale pour garantir la sécurité alimentaire, mais doit rester adaptée et mesurée pour éviter une dégradation des qualités nutritionnelles des produits à base d'insectes.

### **c. Risque fongique**

Les différentes études citées précédemment s'intéressent aussi à la présence d'éléments fongiques, moisissures et levures qui contaminent également les denrées alimentaires. Comme les bactéries, elles peuvent dégrader le produit et/ou présenter un risque toxique pour l'homme (par le biais de toxines notamment).

Les insectes crus présentent une certaine quantité d'espèces fongiques, ce qui conduit à préconiser dans ce cas aussi, une étape de décontamination. Selon l'espèce, les populations fongiques sont variables en quantité et en nature : les grillons semblent présenter des comptages plus élevés que les vers de farine, et chez eux les moisissures sont en plus grandes proportions que les levures alors que c'est l'inverse pour le ver de farine (Vandeweyer et al., 2017a). Cette variabilité peut s'expliquer par des différences intrinsèques à l'espèce, notamment en termes de pourcentage d'eau (valeur plus élevée pour le grillon que pour le ver de farine) mais aussi en lien avec son environnement (contenu en eau et en différentes espèces fongiques de la nourriture principalement) (Finke, 2002; Vandeweyer et al., 2017a).

Des espèces du genre *Fusarium* et *Aspergillus* ont été trouvées au cours de l'élevage du ver de farine *Alphitobius diaperinus* : celles-ci sont capables de produire des mycotoxines potentiellement dangereuses pour la santé humaine (Vandeweyer et al., 2018; Wynants et al., 2018). D'autres espèces comme *I. orientalis* ne présente pas de dangers pour la santé humaine, mais peuvent provoquer de la mortalité chez les insectes (Wynants et al., 2018). En 1996, des chercheurs ont trouvé dans des échantillons de chenilles d'*Imbrasia belina* (largement consommées dans le sud de l'Afrique) des niveaux d'aflatoxines élevés ce qui peut poser problème de santé lors d'une consommation régulière de cette chenille (ANSES, 2015).

Les méthodes de cuisson et de conservation précédemment évoquées sont efficaces dans la diminution des moisissures et des levures comme dans la diminution des bactéries, d'où un risque fongique mineur pour les insectes du commerce (Caparros Megido et al., 2017, 2018; Grabowski and Klein, 2017a; Stoops et al., 2016; Vandeweyer et al., 2017a). Cependant, elles ne permettent pas nécessairement la destruction des mycotoxines produites par certaines espèces fongiques, or celles-ci peuvent représenter un danger pour la santé humaine.

#### **d. Risque viral**

Un certain nombre de virus touchent les insectes, mais ceux-ci leur sont en général spécifiques et donc à priori sans danger pour l'homme. Cependant, certains insectes sont connus pour agir comme vecteur de virus pathogènes pour l'homme (virus de la dengue, virus West Nile, chikungunya) ou l'animal. D'autres insectes pourraient être des vecteurs passifs, notamment les mouches en élevage qui se nourrissent en partie d'excréments potentiellement infectés (EFSA Scientific Committee, 2015).

Actuellement, il n'existe aucune étude sur les risques d'une transmission virale à partir d'insectes, que ce soit par ingestion ou par contact (ANSES, 2015), mais il convient de prêter attention à la qualité de l'alimentation et des procédures de transformation pour limiter ce risque éventuel (EFSA Scientific Committee, 2015).

#### **e. Risque lié aux prions**

La possibilité que des ectoparasites puissent servir de réservoir ou de vecteur aux prions a été évoquée dans plusieurs publications (Lupi, 2003, 2005). La transmission horizontale de la tremblante des petits ruminants dans les troupeaux infectés est reconnue et certains insectes pourraient jouer un rôle actif dans la contamination. Des hamsters nourris expérimentalement avec des insectes ayant ingéré des éléments de système nerveux infectés ont entraîné le développement de la tremblante chez ces animaux (ANSES, 2015). Le rôle des bactéries du genre *Spiroplasma spp* est suspecté dans la transmission des encéphalopathies spongiformes. Cette bactérie se trouve notamment dans l'hémolymphe des insectes,

qui pourraient donc jouer un rôle de réservoirs de prions, voire de vecteurs par le biais de ces bactéries (Bastian, 2005, 2014). Le risque lié aux Agents Transmissibles Non Conventionnels ne peut donc être exclu dans le contexte de la consommation d'insectes.

### **3. Contamination chimique des insectes**

Comme dans les produits issus d'animaux d'élevage conventionnel (mais aussi de végétaux), on peut trouver différents contaminants, de nature et d'origines diverses :

- polluants : dioxines, PCB, retardateurs de flamme,
- résidus de pesticides : organophosphorés, organochlorés,
- métaux lourds : Plomb, Cadmium, Arsenic, Chrome, Mercure, Nickel, Étain.

Selon les espèces et le type d'exposition, ces substances peuvent être accumulées ou au contraire éliminées par les organismes. Le risque est qu'il y ait une accumulation de certains composés au fil de la chaîne alimentaire : par exemple une plante peut être contaminée par des pesticides, consommée par un animal d'élevage (insecte ou autre) qui sera ensuite consommé par la population, ce qui pose la question du devenir de ces résidus au long de cette chaîne et le risque pour la santé encouru par le consommateur final. C'est pourquoi des limites sont habituellement fixées par la Commission Européenne (selon le règlement 2002/32/EC) pour les concentrations en divers éléments pour l'alimentation des animaux d'élevage.

Il est important de chercher à savoir quel rôle les insectes vont avoir dans cette chaîne du point de vue de la gestion de ces molécules indésirables dans notre alimentation, et ainsi de prévenir un éventuel risque pour la santé humaine lors de leur consommation.

#### ***a. Les PCB, les dioxines et les retardateurs de flamme***

Ces éléments font partie des polluants organiques persistants : ils sont issus de rejets dans l'environnement par l'activité humaine, sont persistants dans l'environnement car se dégradent lentement, mais aussi par leurs propriétés d'accumulation dans les tissus graisseux et donc au fil des chaînes alimentaires

(ASEF, site internet). Une exposition à ces substances (principalement par l'alimentation), peut avoir des effets nocifs sur la santé, c'est pourquoi leur utilisation et le contrôle de leur présence est soumis à réglementation depuis plusieurs décennies.

Quelques études s'intéressent à l'accumulation de ces substances par les insectes, principalement au départ dans l'idée de s'en servir comme « témoins » de pollution. Poma et al. s'intéressent à la présence de certains polluants organiques persistants dans des insectes commercialisés pour la consommation humaine en Belgique, ainsi que dans des produits à base d'insectes eux aussi consommés. Ils détectent la présence de certains PCB, de dioxines et de retardateurs de flamme dans les différents produits, mais notent une variabilité importante entre les échantillons, même s'ils sont du même type (Poma et al., 2017). On explique ces variations par le fait que la contamination se fait principalement par l'alimentation et le substrat d'élevage (par les procédures de fabrication aussi pour les retardateurs de flamme), donc la concentration finale sera certainement dépendante des intrants. Cependant, les valeurs mesurées sur ces produits pour les PCB et dioxines sont toujours inférieures aux limites fixées en Union Européenne pour les produits animaux habituellement consommés (Règlement CE/1881/2006) (Poma et al., 2017). En comparaison avec les animaux élevés couramment, les taux trouvés ici sont le plus souvent inférieurs ou égaux à ceux mesurés chez les autres espèces : les risques ne semblent donc pas augmentés avec la consommation d'insectes.

L'enjeu écologique étant important dans le développement de l'élevage d'insectes, la question de la réutilisation de déchets peut se poser quant à son rôle dans l'accumulation de polluants organiques persistants. Une étude de 2014 s'intéresse à l'utilisation de larves de mouche domestique (*Musca domestica*) nourries avec du fumier de poules, comme part de l'alimentation pour des poules pondeuses. Deux faits sont mis en évidence (Nordentoft et al., 2014):

- Il y a accumulation des substances polluantes par les larves (concentration quatre fois plus élevée que dans le fumier)
- La contamination en PCB et dioxines des œufs n'est pas augmentée par la réutilisation de déchets dans la chaîne alimentaire

Ainsi, les insectes aujourd'hui commercialisés en Europe ne semblent pas présenter de risque majeur concernant les polluants principaux, mais ils ont la capacité

de les accumuler dans leur tissu adipeux (comme les vertébrés) ce qui doit être pris en considération.

### ***b. Les pesticides***

Les pesticides sont aujourd'hui largement utilisés pour cultiver les végétaux qui seront ensuite consommés soit directement par la population, soit de manière indirecte en nourrissant les animaux destinés à la consommation humaine. Ainsi, on trouve des résidus de pesticides dans les aliments que nous consommons et notamment les produits animaux. Les insectes sont donc inclus dans ce système puisqu'à l'état sauvage ou élevés par l'homme, ils se nourrissent au moins en partie de végétaux cultivés (Poma et al., 2017). Régulièrement, de nouveaux pesticides sont mis sur le marché alors que d'autres sont interdits d'utilisation, car s'il est difficile de connaître les effets exacts de leur utilisation sur la santé humaine, le rôle de certains comme perturbateurs endocriniens ou dans le développement de cancers a été démontré (ASEF, site internet).

Ces substances chimiques appartiennent elles aussi à la catégorie des polluants organiques persistants et il peut donc y avoir bioaccumulation de celles-ci au fil des chaînes alimentaires. Certains insectes sauvages évoluant à proximité de zones cultivées sont consommés dans certaines parties du monde, et il a été montré que ces insectes peuvent alors contenir ces substances nocives pour la santé et donc présenter un risque sanitaire (Saeed et al., 1993). L'élevage d'insectes permet un meilleur contrôle du milieu de vie et de l'alimentation des animaux et il est donc plus facile de limiter la contamination des insectes produits de cette façon.

Des limites maximales de résidus sont fixées au niveau de l'UE pour tout couple polluant/pollué et doivent être respectées pour l'alimentation animale et humaine, il est donc important de savoir si oui ou non les insectes respectent cette réglementation. Les analyses effectuées sur plusieurs espèces d'insectes et produits à base d'insectes disponibles en Europe ont montré la présence d'un certain nombre de résidus de pesticides en quantité inférieure aux limites fixées (Houbraken et al., 2016; Poma et al., 2017).

Les insectes, et notamment les vers de farine, absorbent les substances présentes dans les végétaux, qu'ils fassent partie du substrat d'élevage ou de leur alimentation. La bioaccumulation est différente selon les caractéristiques chimiques

du produit : des composés hydrophiles vont être peu absorbés et rapidement excrétés, alors qu'au contraire des composés lipophiles seront facilement absorbés et puis seront stockés en partie donc moins rapidement excrétés (Houbraken et al., 2016). Une contamination sur le long terme va conduire à une certaine bioaccumulation, mais une pollution sur seulement quelques jours a aussi un impact sur la qualité de l'insecte consommé. Dans tous les cas, la phase de jeûne pré-abattage (de 24h en général) permet une excrétion non négligeable de ces contaminants qui se trouvent alors diminués dans l'insecte consommé (Houbraken et al., 2016).

Comme toute autre espèce animale que nous consommons, les insectes se trouvent donc impactés par l'accumulation de pesticides, ce qui doit pousser à contrôler les intrants et notamment l'alimentation qui peut être le vecteur de résidus de pesticides.

### ***c. Les métaux lourds***

La présence de métaux lourds chez les insectes est aujourd'hui étudiée car comme les substances citées précédemment, ils sont présents dans l'environnement et peuvent faire l'objet d'accumulation dans les chaînes alimentaires. Les origines et les risques pour la santé humaine liés à ces éléments sont variés, mais un certain nombre sont toxiques à différents point de vue et leur présence dans l'alimentation est soumise à réglementation pour certains (EFSA Scientific Committee, 2015).

Des études se sont intéressées à la présence de ces métaux lourds chez différentes espèces d'insectes commercialisées, et les valeurs ont été comparées à d'autres trouvées chez des espèces animales couramment consommées : notamment les quantités de Plomb (Pb), de Cadmium (Cd) et d'Arsenic (As) sont comparables voire inférieures à celles mesurées chez d'autres espèces, et toujours inférieures aux limites fixées par la réglementation en vigueur (Hyun et al., 2012; Poma et al., 2017).

Concernant la bioaccumulation des métaux lourds, il existe des différences notables entre les espèces d'insectes et selon les éléments considérés. Pour l'arsenic, plusieurs études ont comparé la bioaccumulation de l'élément pour des insectes appartenant à différents ordres et ont trouvé une grande disparité parmi ces animaux : les diptères et orthoptères accumulent peu l'arsenic, alors que les coléoptères,

lépidoptères et odonates en accumulent plus au cours de leur développement (van der Fels-Klerx et al., 2016; Moriarty et al., 2009).

Pour une même espèce considérée, l'accumulation est différente en fonction des éléments. Chez le ver de farine, donc un coléoptère, l'arsenic a tendance à être accumulé, ce qui est très limité pour le cadmium et le plomb. Cette accumulation dépend notamment des organes de stockage de ces éléments : le cadmium est rattaché à des protéines de l'intestin, ce qui est à l'origine d'une élimination rapide de celui-ci, donc peu d'accumulation (van der Fels-Klerx et al., 2016). Certains insectes comme la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*) accumulent le plomb au niveau de leur exosquelette qui comporte alors des concentrations plus importantes que le reste de l'organisme, mais ces spécificités ne sont pas connues pour toutes les espèces actuellement consommées (van der Fels-Klerx et al., 2016).

Ce qui est notable quant à la bioaccumulation de métaux lourds chez les insectes, c'est la grande variabilité entre les espèces. Celle-ci mérite d'être prise en compte afin d'adapter au mieux la réglementation pour chaque élément et chaque espèce ou groupe d'espèces. L'attention peut aussi se porter sur les organes de stockage des différents métaux lourds, afin de potentiellement limiter la consommation d'une partie de l'insecte (van der Fels-Klerx et al., 2016; Hyun et al., 2012). Le contrôle des intrants reste un bon moyen de limiter ces contaminations en élevage.

#### **4. Substances anti-nutritionnelles et toxiques des insectes**

Les dangers chimiques résultent essentiellement de substances fabriquées par l'insecte lui-même ou bien de substances accumulées par lui via l'environnement ou l'alimentation. Toutes les espèces d'insectes ne sont donc pas comestibles en l'état, ou seulement à un certain stade de leur développement (larve ou adulte), et peuvent rester non comestibles même dans le cadre d'un élevage et/ou après transformation par cuisson ou séchage (ANSES, 2015).

### a. Substances toxiques des insectes

Certaines espèces d'insectes synthétisent des substances toxiques comme moyen de défense ou de répulsion. On peut distinguer deux types d'insectes contenant des substances toxiques (ANSES, 2015; Belluco et al., 2013) :

- Les insectes dits phanérottoxiques : ils présentent des dispositifs venimeux externes (dard, pièces buccales, soies urticantes). L'envenimation se produit par inoculation de venin ou contact avec les substances urticantes. Concernant l'alimentation, la consommation des larves est préférée lorsqu'un organe venimeux est présent chez l'adulte, et les chenilles urticantes sont à exclure de la consommation.



Figure 30 : Chenille de *Thaumetopoea pityocampa* présentant des soies urticantes  
Source : aramel.free.fr

- Les insectes dits cryptotoxiques : ils ont la capacité de stocker ou de synthétiser des substances toxiques, mais cette toxicité n'apparaît que lors de la consommation de l'insecte. Il s'agit souvent de phytotoxines, des toxines produites par la plante auxquels les insectes qui la consomment se sont adaptés, parfois en la stockant (notamment certains lépidoptères). Il convient donc d'alimenter les insectes d'élevage uniquement avec des plantes adaptées à leur métabolisme et en évitant toute production ou bioaccumulation de métabolites secondaires toxiques pour les vertébrés.

Des substances cyanogéniques sont présentes chez certains insectes, appartenant principalement aux ordres des lépidoptères et des coléoptères. Ces composés ont des propriétés d'inhibition de certaines enzymes d'importance pour le métabolisme oxydatif (Belluco et al., 2013). Des papillons du genre *Zygaena*



Figure 31 : Papillon du genre *Synthomis*  
Source : Zagobelny et al., 2009.

et *Synthomis* contiennent ces substances et sont consommés notamment dans une région d'Italie de manière traditionnelle : une étude toxicologique a démontré que cette consommation concernant principalement les déjections sucrées de l'insecte, les risques d'intoxication dans ce cadre sont très limités voire nuls (Zagobelny et al., 2009).

Les benzoquinones auraient des effets toxiques, notamment carcinogénétiques et entérotoxiques. Elles sont émises par certains insectes de la famille des ténébrionidés, du genre *Tribolium* (*Tribolium confusum* et *Tribolium castaneum*), et contaminent les substrats de ces insectes donc notamment les produits comme la farine de blé (Belluco et al., 2013; Lis et al., 2011). On retrouve aussi ces substances chez un autre ténébrionidé, *Ulomoides dermesetoides*, utilisé en Argentine comme médecine alternative pour ces propriétés cytotoxiques contre le cancer du poumon (non démontrées à ce jour) (Belluco et al., 2013).

D'autres substances aux propriétés toxiques ont été mises en évidence chez certaines espèces d'insectes :

- la cantharidine (par certaines mouches, diptères de la famille des méloïdés) : brûlures chimiques de contact (Schlüter et al., 2017),
- le toluène (par certains capricornes, coléoptères du genre *Syllitus* et *Stenocentrus*), dépresseur du système nerveux, toxique pour le cerveau, le foie et les reins (Belluco et al., 2013),
- des stéroïdes, comme la testostérone ou le dihydrotestostérone (par certains coléoptères de la famille des disticidés) : retard de croissance, hypofertilité, masculinisation, effets cancérigène sur le foie (Belluco et al., 2013).

### **b. Substances anti-nutritionnelles des insectes**

La présence de substances anti-nutritionnelles a aussi été mise en évidence chez certains insectes. Cet élément est important à prendre en compte, surtout chez certains individus présentant une alimentation carencée en vitamines ou tout autre nutriment (ANSES, 2015; Belluco et al., 2013).

Certains vers à soie contiennent des thiaminases, notamment celui traditionnellement consommé au Nigeria du genre *Anaphe* (comme c'est le cas pour certaines plantes, poissons ou crustacées). La thiaminase agit en diminuant la quantité de thiamine (ou vitamine B1) qui participe notamment au métabolisme des glucides et à la production d'énergie pour l'organisme. Au Nigeria, la consommation de pupes de cet insecte en quantité importante a conduit à l'observation de syndrome ataxique en lien avec les thiaminases, dans un contexte de carence en vitamine A et autres nutriments. Cette enzyme présente une activité à haute température, donc il est préférable d'appliquer une cuisson prolongée à l'insecte avant la consommation. On retrouve des thiaminases chez le ver à soie asiatique (*Bombyx mori*) lui aussi couramment consommé sous forme de pupes, mais en quantité trois fois moindre, ce qui limite le risque, bien qu'une cuisson soit conseillée (Belluco et al., 2013; Nishimune et al., 2000).

Les tanins et phénols sont aussi considérés comme substances anti-nutritionnelles et sont retrouvés chez différentes espèces d'insectes. Une étude portant sur 5 espèces d'insectes couramment consommés en Inde a montré que leur concentration est en moyenne de 0,52% ce qui reste limité en comparaison avec d'autres insectes comme des sauterelles ou des termites (Shantibala et al., 2014). À fortes doses, les tanins sont toxiques par leur capacité à précipiter les protéines (ANSES, 2015).

L'acide phytique diminue la biodisponibilité de phosphore en le complexant en phytate (ANSES, 2015).

Les oxalates, s'ils sont absorbés en grande quantité, peuvent provoquer des irritations du tractus digestif, des troubles de la circulation sanguine et de dommages rénaux (ANSES, 2015).

La chitine, élément appartenant à l'exosquelette des insectes, peut être considérée comme facteur antinutritionnel car elle est peu ou pas digérée par l'organisme qui la consomme et peut donc conduire à des phénomènes de constipation et, dans des cas extrêmes, à une occlusion digestive (ANSES, 2015).

De nombreuses substances toxiques ou anti-nutritionnelles sont connues chez les insectes, mais en ce qui concerne ceux qui sont consommés de manière traditionnelle à travers le monde, peu d'effets toxiques majeurs ont été rapportés et le risque toxique semble donc limité pour une consommation raisonnée. Cependant, il est à noter qu'il manque des données toxicologiques sur la plupart des insectes

consommés aujourd'hui, bien que certains comme le ver de farine *Tenebrio molitor*, soient très proches phylogénétiquement d'espèces présentant une toxicité reconnue (Gao et al., 2018; Schlüter et al., 2017). Le ministère de la santé chinois a fixé un seuil d'innocuité pour la consommation de protéines issues de pupes de vers à soie (1,5g/kg/j de protéines), en se basant sur de nombreuses études toxiques et génotoxiques sur l'animal et l'homme : ce genre d'indice pourrait être mis en place pour d'autres espèces consommées couramment (Belluco et al., 2013).

---

L'entomophagie présente un risque non négligeable de manifestation de réaction allergique, information à signaler sur les produits contenant des insectes et qui devraient préciser la nature des populations à risques (personnes allergiques aux crustacées principalement). Le risque infectieux ne peut être écarté, et des procédures et des seuils spécifiques doivent être mis en place pour assurer la sécurité microbiologique des aliments à base d'insectes. Le risque chimique semble limité avec des niveaux de contamination faibles et proches de produits connus, ainsi que des toxines spécifiques à certaines espèces qui peuvent être écartées de la consommation. Cependant, les connaissances restent limitées étant donné le nombre d'espèces d'insectes consommées et la variabilité interspécifique considérable au sein de cette classe. En conséquence, il conviendrait de fixer des procédures et des seuils pour chaque espèce ou groupe d'espèces et non pour l'ensemble « insectes ».

## **B. ACCEPTATION SOCIALE DE L'ENTOMOPHAGIE EN EUROPE**

Depuis, une dizaine d'années, les études sur le sujet de l'acceptation de l'entomophagie en Europe se multiplient. Selon ces études, la consommation d'insectes reste très faible, peu de gens ont l'occasion et/ou l'envie d'en manger alors qu'une production se développe en UE. Des tendances ressortent sur les freins principaux au développement de l'entomophagie mais aussi sur les motivations des consommateurs, et différentes stratégies sont envisagées pour encourager cette pratique.

Les études sur le sujet se sont souvent intéressées aux caractéristiques sociodémographiques des répondants (sexe, âge, niveau d'étude,...) afin de voir s'il était possible de définir une population plus à même de consommer ou au contraire de rejeter les insectes. Les résultats sont contradictoires sur le sujet, dépendant des études considérées notamment concernant l'âge et le sexe, en partie en lien avec une représentativité toute relative des échantillons (Caparros Megido et al., 2014b; Hartmann and Siegrist, 2017a). C'est plutôt le contexte dans lequel vit la personne, sa culture, les pratiques de ses proches (si certains consomment déjà des insectes ou au contraire les rejettent fortement) qui l'influencent en partie (Sogari et al., 2017). Enfin, le fait d'avoir des convictions ou non en termes d'écologie et/ou d'éthique va aussi influencer cette volonté de pratiquer l'entomophagie.

## **1. Les causes du rejet de l'entomophagie en Europe**

En 1980, Rozin définit les trois motifs principaux du rejet d'un aliment : le danger, l'aversion et le dégoût. Si on l'applique aux insectes, on peut développer les éléments suivants (Gallen and Pantin-Sohier, 2015) :

- Le danger : l'insecte est un nouvel aliment ce qui implique un risque potentiel, quel qu'il soit. Les insectes ont une image largement liée au danger en occident : destruction de cultures, vecteurs de maladies, parasites... Il existe peu d'insectes dangereux, mais ce petit nombre a un impact sur l'imaginaire collectif, et manger des insectes est souvent perçu de manière négative. Les connaissances dans le domaine peuvent influencer le danger perçu.
- L'aversion : en raison de l'aspect lié aux caractéristiques organoleptiques du nouvel aliment qu'est l'insecte, on peut avoir des craintes et des attentes particulières concernant son goût ou sa consistance par exemple. Le fait de goûter confirmera ou non cette aversion.
- Le dégoût : il s'agit d'une réaction émotionnelle face à l'aliment (ou l'idée de l'aliment), qui est souvent très marquée face aux insectes notamment. L'animalité peut provoquer ce dégoût (insecte entier surtout), l'éloignement des insectes par rapport à notre espèce, l'image du mode de vie de certains insectes aussi (parasites notamment). Cet élément peut totalement exclure la possibilité de ne serait-ce que goûter les insectes.

Les insectes sont victimes de néophobie en Europe, c'est-à-dire que c'est la peur de la nouveauté, de ce qui n'est pas culturellement habituel qui empêche un certain nombre de personnes de consommer des insectes (Looy et al., 2014). L'influence de la néophobie est majeure sur le choix des participants aux expériences de goûter ou non aux produits à base d'insectes proposés et plus globalement à leur volonté d'intégrer les insectes à leur alimentation (Verbeke, 2015; Wilkinson et al., 2018).

La réaction émotionnelle a une grande importance dans l'attitude des gens face aux insectes, le dégoût étant souvent ressenti par une grande proportion des interrogés. Les termes de « malaise » face aux insectes, d'écoeurement ou encore de peur sont aussi employés, globalement des émotions fortes qui entraînent un rejet au moins partiel (Gmuer et al., 2016).

Les insectes étant souvent présentés comme alternative à la viande conventionnelle, les personnes ayant une haute opinion de la viande du point de vue nutritionnel ou gustatif sont d'autant plus opposées à l'apparition des insectes dans leur assiette. Celle-ci a de plus une place très importante au sein du repas traditionnel, d'autant plus en France où la place du repas dans la société est majeure (Verbeke, 2015).

La consommation d'insectes renvoie aussi à une alimentation de type primitif ou en lien avec la nécessité et l'extrême pauvreté, image qui ne convainc pas facilement les consommateurs européens pour la majorité éloignés de telles considérations les concernant (Gallen and Pantin-Sohier, 2015).

## **2. Les motivations des consommateurs intéressés par l'entomophagie**

L'enjeu écologique est d'actualité dans les médias et la population est de plus en plus au courant de l'impact environnemental lié à leur consommation alimentaire : une étude de 2015 sur un échantillon de 2600 personnes en Suisse a montré une augmentation significative de cette prise de conscience entre 2010 et 2014 (Siegrist et al., 2015). L'impact moindre de la production d'insectes par rapport à celle de viande conventionnelle est un argument en faveur du développement de l'entomophagie.

L'éthique dans le cadre des productions animales est aussi un sujet sensible actuellement. Différents scandales ont éclaté concernant certains abattoirs et des régimes sans viande ou sans produits d'origine animale se développent notamment

en Europe. Ainsi, l'éloignement phylogénétique des insectes, plus important que pour un porc, voire un poulet, rend pour un certain nombre de personnes leur élevage de manière intensive et leur abattage plus acceptables (Pali-Schöll et al., 2018). Cependant, il s'agit toujours d'animaux élevés et abattus en grand nombre pour notre consommation, ce qui n'est donc pas nécessairement plus acceptable pour certains courants de pensée (courant antispéciste notamment).

L'apport nutritionnel peut jouer en faveur des insectes, notamment grâce à l'attrait qu'ils suscitent par leur richesse en protéines. La viande conventionnelle a encore une image très positive du point de vue diététique dans la population globale, ce qui n'encourage pas nécessairement à faire varier les habitudes de ses amateurs. Cependant, la mise en évidence d'une non-nécessité à consommer beaucoup de viande et de certains aspects délétères d'une consommation excessive de certaines viandes pourrait favoriser les insectes. Par ailleurs, dans un contexte de manque de nourriture, la question de l'entomophagie semble beaucoup plus largement envisagée (Looy and Wood, 2006).

Le côté « naturel » de l'insecte peut aussi attirer les consommateurs européens. En effet, beaucoup d'éléments marketing jouent actuellement sur l'aspect « retour à la nature » de certains produits, en favorisant les produits non transformés, locaux, biologiques... Cadre dans lequel les insectes peuvent tout-à-fait être inclus, bien qu'ils soient vendus le plus souvent cuits et déshydratés, c'est l'insecte « pur » qui peut être consommé (Terrien, 2018). À l'opposé, on trouve certains substituts à la viande, comme la « viande *in vitro* » qui est perçue comme très artificielle, donc moins acceptée sur cet aspect (Hartmann and Siegrist, 2017b).

Enfin, la curiosité, le côté « aventure » dans le fait de manger des insectes peuvent être des moteurs pour l'entomophagie chez certaines personnes. Le fait de manger ces animaux repoussants dans l'imaginaire collectif peut servir à se prouver ou à prouver à ses proches un certain courage (Gallen and Pantin-Sohier, 2015; Ruby et al., 2015). La curiosité peut aussi se trouver sur les apports culinaires de ces nouveaux produits alimentaires, de nouvelles textures, de nouveaux goûts et donc de nouveaux plats à découvrir.

### **3. Les stratégies permettant d'augmenter l'acceptabilité de la consommation d'insectes**

Face à une consommation faible d'insectes par la population européenne et dans un contexte où le développement de l'entomophagie est encouragé par les organismes officiels nationaux et internationaux, il est intéressant de comprendre de quelle manière il semble possible de faire évoluer la situation actuelle.

#### ***a. Informer sur les différents aspects de l'entomophagie***

Le manque de connaissances sur l'entomophagie et l'élevage d'insectes comestibles est l'un des aspects qui ressort le plus au cours des études. Jouer sur ce point est primordial pour diminuer le frein « danger » lié à cette pratique (Gallen and Pantin-Sohier, 2015).

Concernant les insectes en eux-mêmes, les personnes interrogées ont parfois des craintes quant à l'hygiène de tels aliments en lien avec des conditions d'élevage inconnues. La préparation peut aussi inquiéter : retrait d'œufs éventuels ou de certains appendices (ailes, pattes),... (Gallen and Pantin-Sohier, 2015). Ainsi, les connaissances sur le sujet permettraient de rassurer les consommateurs sur l'entomophagie qui à priori ne présente pas de risque majeur pour la santé, du moins lorsqu'ils sont issus d'élevages européens. L'aspect éthique de l'élevage d'insectes est peu mis en avant pour l'instant. Par exemple, l'habitude naturelle de certaines espèces à vivre dans des conditions aux densités élevées d'individus présente un avantage en termes de productivité sans pour autant sembler aller contre le bien-être animal : ceci est un avantage majeur dans un contexte où les élevages conventionnels considérés intensifs sont rejetés par une partie des consommateurs (Pali-Schöll et al., 2018).

Comme évoqué précédemment, la conscience des personnes interrogées concernant l'impact environnemental de leurs choix alimentaires reste limitée (en comparaison avec le tri des emballages notamment) : selon une revue de 2017, seuls 18 à 38% des personnes interrogées ont une réelle connaissance de l'impact de leur consommation de viande sur l'environnement (Hartmann and Siegrist, 2017b). Il y a cependant une certaine prise de conscience ces dernières années (Siegrist et al.,

2015). Les insectes, lorsqu'ils sont envisagés comme alternative à la consommation de viande, présentent un réel intérêt du point de vue de l'impact environnemental ce qui doit être communiqué aux consommateurs (van Huis, 2016). Les personnes ayant conscience de cet élément ont une volonté significativement plus élevée que les autres d'intégrer les insectes à leur alimentation, mais cet argument n'atteint pas toutes les personnes interrogées (Verbeke, 2015). Cependant, la mise en valeur de l'entomophagie comme substitut à la viande n'est pas nécessairement la meilleure stratégie pour l'intégrer aux pratiques alimentaires des européens, bien que cette vision semble la plus favorable en matière d'écologie.

La notion d'impact écologique ne touche pas tout le monde de la même manière, et cet argument seul ne permettra pas d'encourager l'entomophagie : il faut que les insectes présentent un intérêt pour la personne qui les consomme (Siegrist et al., 2015). Les insectes présentent des qualités nutritionnelles assez semblables à celles de la viande, avec certaines particularités propres à chaque espèce, mais de manière générale leur intégration à notre alimentation est positive du point de vue diététique (Rumpold et al., 2014). Cet aspect semble intégré par une certaine partie des personnes interrogées, qui considèrent notamment d'emblée dans une étude récente, qu'un burger contenant une certaine portion d'insectes (sous forme de farine) serait plus diététique qu'un burger classique à base de viande de bœuf (Schouteten et al., 2016). Certaines marques jouent sur l'apport en protéines notamment dans le cadre du sport, comme le producteur franco-thaïlandais Insectéo qui a récemment créé la marque Kinjao qui revendique la fabrication de produits à base d'insectes destinés aux sportifs (pâtes, barres énergétiques, farines à intégrer à des préparations) (insectescomestibles.fr, site internet).



Figure 32 : Barre énergétique à base de farine de grillon proposée par la marque Kinjao.  
Source : Kinjao.com

Les insectes sont assez éloignés au premier abord de la nourriture que nous connaissons, ce qui rend difficile pour les personnes interrogées de s'imaginer les intégrer à leur alimentation. Dans un contexte où nous manquons souvent de temps

pour cuisiner, les produits préparés rapidement et simplement sont plus facilement adoptés. Ainsi, le fait de fournir des techniques de préparation ainsi que des associations avec d'autres produits permet d'augmenter la volonté des gens à intégrer les insectes à leur alimentation (Caparros Megido et al., 2014a; Tan et al., 2016a).

Certaines études ont montré que les informations fournies sur les bienfaits sociétaux et personnels ont un effet significatif sur la volonté des consommateurs d'en manger (Verneau et al., 2016). Cependant, cet effet reste relatif car les informations sur l'impact environnemental face à d'autres faits plus concrets (prix d'achat, goût et disponibilité) ont une influence limitée sur les potentiels acheteurs (House, 2016; Siegrist et al., 2015). De plus, le discours énoncé aura très peu d'effet voire aucun sur le ressenti émotionnel lorsque le dégoût est très marqué notamment (Schouteten et al., 2016).

### ***b. Encourager l'expérience gustative***

Un autre facteur qui semble influencer de manière équivalente la volonté de consommer des insectes est la possibilité de goûter ce nouvel aliment (Lensvelt and Steenbekkers, 2014). Il existe peu d'études qui proposent effectivement des insectes aux participants, ce qui limite les résultats sur le sujet (Hartmann and Siegrist, 2017a).

La difficulté avec l'entomophagie, c'est que nous manquons de modèle de consommation d'insectes. En effet, en Europe les occasions d'en consommer ou de voir d'autres personnes en consommer sont assez rares à moins d'en avoir réellement la volonté par soi-même. Or, il a été montré dans un grand nombre d'études à quel point le fait d'avoir déjà consommé des insectes avant l'étude augmentait la probabilité d'en consommer à nouveau (Fischer and Steenbekkers, 2018; Hartmann and Siegrist, 2016, 2017b). L'intérêt principal de manifestations du type « banquet d'insectes » où les gens ont l'occasion d'en consommer ou au moins d'en entendre parler, est que l'on agit sur deux freins majeurs à l'entomophagie : la néophobie puisque le côté « nouveau » des insectes est diminué par une première exposition, mais aussi le dégoût qui est atténué par l'habituation (Pambo et al., 2018; Schouteten et al., 2016).

Plusieurs études ont mis en évidence que les produits à base de farine d'insectes (où ceux-ci sont donc invisibles) sont plus facilement acceptés et envisagés comme aliment que les insectes entiers (Gallen and Pantin-Sohier, 2015; Hartmann and

Siegrist, 2016). La mise en avant des produits à base de farine d'insectes aurait un double avantage : d'une part ils sont plus facilement consommés que les insectes entiers et d'autre part les personnes qui les goûtent sont plus disposées, suite à cette expérience, à goûter les insectes entiers (Gmuer et al., 2016; Hartmann and Siegrist, 2016). Concernant les insectes entiers, notamment présentés comme produits pour l'apéritif, l'association à des saveurs connues comme une aromatisation « Barbecue » par exemple semble augmenter l'acceptabilité de ces aliments par rapport à une présentation non assaisonnée (Caparros Megido et al., 2014b; Gallen and Pantin-Sohier, 2015).

Avant d'avoir goûté aux insectes, les personnes interrogées ont des *a priori* sur les qualités organoleptiques de tels produits et s'attendent en général à des qualités inférieures aux produits homologues lorsqu'ils sont comparés (Tan et al., 2016a). Si les personnes ont l'occasion de goûter, les produits proposés doivent être à la hauteur de leurs attentes, car si le goût et la consistance ne sont pas appréciés, les personnes ne souhaiteront pas renouveler l'expérience dans leur alimentation (Schouteten et al., 2016). Deux études comparant des burgers classique avec des burgers à base d'insectes ou d'éléments végétaux ont montré que le burger à base d'insectes est plus apprécié que le végétal mais moins que l'original au bœuf, ce qui pousse à améliorer encore la préparation (Caparros Megido et al., 2016; Schouteten et al., 2016).

Si un produit à base d'insectes est présenté comme substitut à un autre produit (carné ou non), un écart en termes de caractéristiques organoleptiques sera perçu comme plutôt négatif (Pambo et al., 2018). Il faudrait donc un produit à base d'insectes qui se rapproche de l'original (végétal ou à base de viande) en termes de goût, d'aspect et de consistance, mais qui potentiellement apporte un léger mieux (Tan et al., 2016b, 2017).

Le contexte d'exposition aux insectes peut influencer l'acceptation de l'entomophagie. La plupart des études se déroulent soit en laboratoire, soit dans des universités où l'aspect « scientifique » est marqué, et peut donc augmenter artificiellement la volonté des personnes à goûter les insectes (Caparros Megido et al., 2014b; Schouteten et al., 2016). Pour limiter l'influence de ce cadre expérimental à goûter les insectes, une étude de 2016 a laissé les participants repartir chez eux avec une barre chocolatée à base de farine de grillons qui était « offerte », donc à priori sans nécessité de la consommer effectivement : un appel aux participants 15 jours après le déroulement de l'étude a montré qu'une large proportion d'entre eux avait consommé la barre sans y être encouragée, ce qui indiquerait que l'impact « contexte

d'étude scientifique » reste limité (Verneau et al., 2016). La consommation d'insectes serait aussi encouragée dans un contexte social, avec une mise en valeur de la curiosité voire du « goût de l'aventure » pour certaines personnes voulant prouver qu'elles sont capables de goûter des insectes malgré le rejet global de cette pratique (Ruby et al., 2015).

Une étude de 2017 a montré que le rejet de l'entomophagie passe de 23% à seulement 7% pour un panel de personnes ayant goûté un cookie à base de farine d'insectes (Sogari et al., 2017). Ainsi, si le produit proposé à un public de consommateurs est satisfaisant du point de vue organoleptique et peut se rattacher à des pratiques d'alimentation connues, les « banquets d'insectes » présentent un réel intérêt pour augmenter l'acceptation sociale de l'entomophagie. Une exposition répétée à certains substituts à la viande sur plusieurs semaines au domicile des personnes a d'ailleurs entraîné une augmentation de l'acceptation de ces nouveaux produits, ce qui montre l'impact d'une certaine habitude aux nouveaux aliments donc potentiellement aux insectes (Hoek et al., 2013).

### ***c. Répondre aux attentes des consommateurs***

Les insectes sont éloignés des produits que nous consommons en Europe, ce qui les rend naturellement difficiles à envisager dans notre alimentation de tous les jours (Gmuer et al., 2016). En 2013, l'équipe de Caparros s'est intéressée à l'image de la place des insectes dans un repas pour un échantillon de la population belge montrant un intérêt pour les insectes (visiteurs d'un insectarium) (Caparros Megido et al., 2014b) :

- à l'apéritif : 37%
- ajout au plat principal : 26%
- ajout au dessert : 23%
- ajout dans une salade : 7%
- ajout dans une soupe : 6%
- consommés sous leur forme naturelle : 1%

Il y a donc une certaine variabilité des manières d'intégrer les insectes à notre alimentation et celles-ci sont envisagées par différents producteurs d'insectes et produits à base d'insectes.

Comme évoqué précédemment, les insectes sont plus facilement goûtés lorsqu'ils se présentent sous forme de farine intégrée à un produit plutôt qu'en entier, et cette préférence est la même lorsqu'il s'agit d'imaginer les intégrer à une alimentation régulière. Certains repères, comme une aromatisation des insectes pour l'apéritif permet d'augmenter l'acceptation de ceux-ci, on les associe par exemple plus facilement à un apéritif, notamment lorsqu'on retrouve un croustillant et un goût se rapprochant de chips (Gallen and Pantin-Sohier, 2015; Schösler et al., 2012). En ce qui concerne précisément le degré de process pour des insectes présentés pour l'apéritif, les tortillas à base de farine d'insectes ou d'insectes broyés plus grossièrement sont plus largement choisies que les grillons entiers mélangés aux tortillas ou bien seuls (Gmuer et al., 2016).

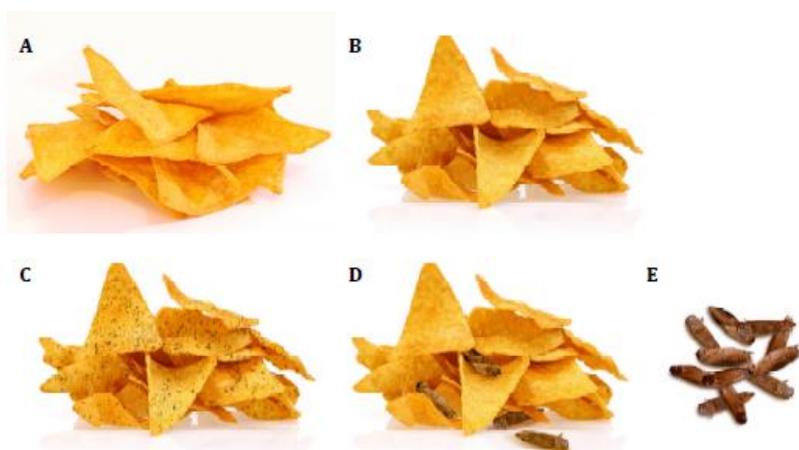


Figure 33 : Images proposées par Gmuer et al. aux participants de leur étude.

A : Tortillas à la farine de maïs, recette originale. B: Tortillas avec une part de farine de grillon (non visibles). C: Tortillas avec une part de grillons broyés (petits morceaux visibles). D : Tortillas (recette originale) mélangées à des grillons déshydratés nature. E : Grillons déshydratés nature seuls.

Source : Gmuer et al., 2016.

Dans certains cas cependant, la vision de l'insecte entier est plutôt mieux acceptée : c'est le cas dans l'étude de Schösler et al. en 2012 où les criquets enrobés de chocolat seraient préférés aux insectes seuls, mais toujours moins qu'un aliment à base de farine d'insectes (Schösler et al., 2012).



Figure 34 : Boulettes et "steak" à base d'insectes commercialisés par l'entreprise suisse Essento. Source : coop.ch

On présente souvent les insectes comme une alternative à la viande étant donnée leur proximité en termes d'apport nutritionnel ainsi que pour des considérations écologiques. Or, si les personnes interrogées sont de plus en plus prêtes à prendre en considération l'environnement en réduisant leur consommation de viande ou choisissant des produits de l'agriculture durable ou biologique, les produits présentés comme substituts à la viande ne sont pas pour autant recherchés (Vanhonacker et al., 2013). Lorsqu'on s'intéresse aux

substituts à la viande à base d'insectes disponibles sur le marché, on trouve des burgers dont le steak contient un certain pourcentage d'insectes ou encore des boulettes à base d'insectes, mais ce n'est finalement pas la majorité des produits proposés. Les études qui comparent des burgers aux insectes à des burgers conventionnels (au bœuf) et à des burgers végétariens ont montré un certain intérêt des consommateurs pour les produits à base d'insectes, vus comme plus intéressants du point de vue nutritionnel et meilleur au goût que le végétarien (mais moins que celui au bœuf) (Caparros Megido et al., 2016; Schouteten et al., 2016). Lorsqu'ils sont comparés à d'autres (à base de lentilles, d'algue, de préparation hybride avec un certain pourcentage de viande), les substituts à base d'insectes sont les moins recherchés, les personnes s'intéressent d'abord aux substituts végétaux (de Boer et al., 2013). Dans un cadre où la viande conventionnelle tient une place importante dans le régime alimentaire le plus répandu, les plats présentés comme complets à base d'insectes semblent plus indiqués qu'une substitution directe de la viande en elle-même : par exemple, une pizza dont la pâte est à base de farine d'insectes est un aspect de l'entomophagie plutôt bien accepté (Hartmann and Siegrist, 2017a; Schösler et al., 2012).

Un produit à base d'insectes doit être en accord avec l'image qu'en ont les consommateurs, car les produits ne correspondant pas à cette image ont peu de chances d'être rapidement intégrés à notre alimentation même s'ils sont bons au goût (Tan et al., 2016b). Une étude de 2017 compare notamment des boulettes à base de

farine d'insectes avec une boisson à base de farine d'insectes, tous deux présentés comme substituts à leurs homologues carné et lacté respectivement : les boulettes paraissent alors beaucoup plus appropriées que la boisson, et l'acceptation qui en résulte est alors plus importante (Tan et al., 2017). Il n'existe à priori jusqu'à aujourd'hui qu'une seule étude dont l'objet a été de demander directement aux participants ce qu'ils voudraient voir comme produits à base d'insectes (protéines d'insectes dans ce cas) : il s'agissait pour les participants d'imaginer un produit en le dessinant, en le décrivant mais aussi en précisant des aspects marketing paraissant importants pour en favoriser l'achat. Les produits imaginés sont majoritairement des en-cas sucrés ou à consommer au petit-déjeuner (barres, « céréales », boissons), et donc à priori éloignés d'un rapport à la viande. La promotion du produit se fait sur la praticité, les bienfaits pour la santé ainsi que la durabilité, et s'adresse principalement aux enfants (52%) et aux consommateurs orientés « fitness ». Enfin, les produits à base d'insectes sont présentés comme des produits « premium », donc plus chers que la moyenne (Clarkson et al., 2018). Cette étude néo-zélandaise se concentre certes sur des extraits protéiques d'insectes et non sur des farines complètes, mais montre qu'il y a parfois un écart entre la vision de la population et ce qui est effectivement proposé ; il serait donc intéressant de développer d'autres études sur le sujet.

Si de manière ponctuelle, une certaine part de la population européenne est prête à goûter des insectes entiers ou intégrés à des produits en tout genre, le développement d'une réelle entomophagie dépend d'un accord entre l'offre et la demande de produits à base d'insectes. Ainsi, si l'aspect substitution de la viande reste une possibilité favorable du point de vue environnemental et nutritionnel, ce n'est pas nécessairement le cadre le plus approprié pour encourager la consommation d'insectes de manière durable dans les pays occidentaux.

#### ***d. Privilégier certains insectes***

On a tendance à considérer les insectes comme un groupe uniforme alors qu'au contraire sur bien des aspects, la diversité au sein de cette classe est grande, notamment en termes d'acceptation sociale. La plupart des études sur le sujet s'intéressent à une seule espèce d'insectes qu'elles proposent éventuellement sous plusieurs formes, ou intégrés de différentes manières, mais les espèces sont rarement

comparées. Une étude hollandaise publiée en 2018 montre des différences significatives pour l'acceptation de certaines espèces par rapport à d'autres : en effet, les vers de farine, grillons et criquets (présents sur le marché hollandais lors de l'étude) sont globalement plus acceptés comme aliment que l'ensemble des autres espèces proposées. Cependant, ces résultats ne sont réellement significatifs que pour les personnes ayant déjà consommé des insectes (45% des participants ici), ce qui met à nouveau en évidence l'importance d'une première expérience dans la volonté de consommer des insectes (Fischer and Steenbekkers, 2018).

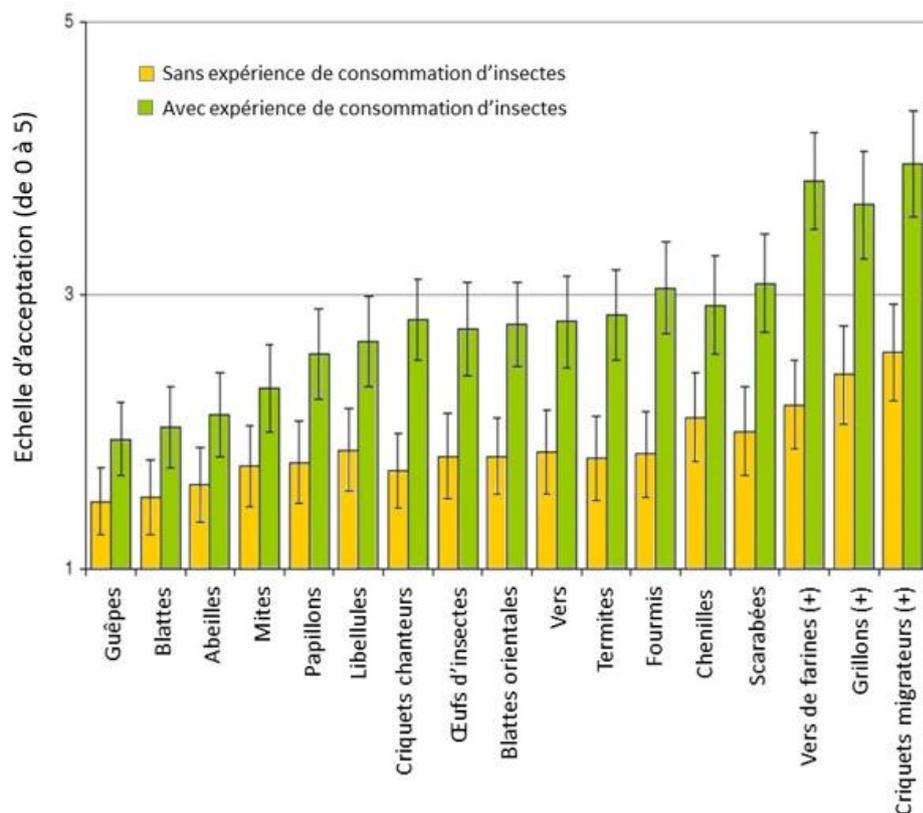


Figure 35 : Différence d'acceptation entre espèces d'insectes et selon l'existence d'une expérience antérieure d'entomophagie ou non. Les espèces comportant un (+) étaient consommés au Pays-Bas au moment de l'étude. Source : Fischer et al., 2018

Certaines espèces au contraire, semblent moins acceptées quel que soit le groupe, probablement en lien avec le dégoût ou la peur : guêpe, abeille, blatte et mite. Certains éléments sont perçus comme négatifs et vont plus facilement inspirer le dégoût et/ou la peur : une taille importante, certains appendices visibles (pattes, ailes et têtes chez les orthoptères notamment), des habitudes alimentaires (mouches et blattes qui peuvent être associées à des environnements insalubres),... (Gallen and Pantin-Sohier, 2015; Terrien, 2018). On retrouve d'ailleurs ce même rejet pour les blattes dans une étude qui s'intéresse à des consommateurs Etatsuniens et Indiens (Ruby et al., 2015).

### **e. Limites des études actuelles et perspectives**

Une revue de 2017 fait le bilan des études s'intéressant à l'acceptation des substituts à la viande en Europe et conclut qu'il y a un certain manque d'études recherchant des stratégies pour faire adopter ces substituts, et notamment les insectes (Hartmann and Siegrist, 2017b). Dans ce cadre de volonté de faire diminuer la consommation de viande, la proposition de substituts plutôt qu'une simple réduction est déjà perçue de manière plus positive (Terrien, 2018).

Il serait pertinent de s'intéresser principalement aux personnes qui en consomment déjà ou sont motivées pour en consommer, car cela permettrait de s'adapter à leurs demandes, de faire des propositions plus concrètes (House, 2016) :

- faire goûter des produits déjà existant et dont on sait qu'ils sont plus facilement acceptés (Hartmann and Siegrist, 2016) ;
- fournir des informations concrètes comme un prix d'achat, des lieux de disponibilité (pour achat ou consommation) ;
- offrir des garanties car nous y sommes habitués notamment dans l'achat de produits animaux (Label Rouge, AOP, Agriculture biologique) (Terrien, 2018) ;
- fournir des informations sur les manières de consommer les insectes.

Au contraire, des personnes profondément dégoûtées par les insectes ou rejetant globalement les aliments qui ne font pas partie de leur culture seront difficiles à convaincre quel que soit l'aspect, le goût, le prix ou encore la garantie à l'achat (Tan et al., 2017).

Une des stratégies qui semblent pertinentes est le fait de s'intéresser à l'éducation à l'entomophagie. En effet, elle est totalement absente des cultures européennes, ce qui rend difficile de l'imaginer pour soi-même ou ses proches. Le fait de fournir des informations sur le sujet à la population globale et de faire goûter les insectes, entre autres aux enfants qui ont moins d'à priori, semble être une bonne manière de développer la consommation d'insectes (Lensvelt and Steenbekkers, 2014; Terrien, 2018).

Les études jusqu'alors réalisées sont le plus souvent effectuées sur un petit nombre de personnes (une centaine en générale) et le panel est souvent restreint en terme d'âge notamment mais aussi de formation : en effet, un certain nombre d'études se déroulent dans le cadre universitaire, et principalement dans des domaines liés aux insectes ou à l'alimentation, ce qui peut influencer les résultats. Les études

s'intéressant à un panel plus large de personnes se déroulent le plus souvent en ligne, et les questionnaires désignent les produits à base d'insectes par des explications écrites plus fréquemment que par des images, ce qui laisse libre cours à l'imagination des personnes interrogées : il y a donc certainement des différences entre ce que pensent ressentir les consommateurs face à un produit à base d'insectes, par rapport à ce que leur inspirerait un aperçu visuel. Les expositions directes sont encore plus rares, alors qu'elles permettent d'avoir une confrontation réelle donc des réponses à priori plus objectives par les participants, qui ont en plus la possibilité de goûter le plus souvent, élément favorable pour une acceptation future (Hartmann and Siegrist, 2017a).

---

En conclusion, les barrières à la consommation d'insectes en Europe ne semblent pas insurmontables car la population s'y intéresse de plus en plus, et les arguments écologique, nutritionnel et éthique ont de plus en plus de poids dans le choix des consommateurs. La stratégie principale semble être de familiariser la population avec cette pratique nouvelle, sur les techniques de production, sur les bienfaits sociétaux et personnels associés mais aussi sur des considérations plus pratiques telles que le prix d'un steak d'insectes ou le temps de cuisson d'un ver de farine à la poêle. Cette familiarisation passe aussi par des possibilités accrues de goûter ou bien simplement de voir d'autres personnes goûter des insectes, d'en voir dans les magasins ou bien à la carte dans un restaurant. Les produits disponibles doivent avoir un réel intérêt du point de vue organoleptique car c'est cela qui va aussi donner envie d'en consommer et de renouveler l'expérience.

Dans un cadre où les enjeux écologiques et nutritionnels à l'échelle planétaire nous poussent à diminuer notre consommation de viande, on peut se demander si culturellement la consommation d'insectes pourra s'orienter réellement à terme comme une substitution à la viande conventionnelle. Dans le cas contraire, les bénéfices de l'entomophagie seraient alors réduits à une échelle globale (Hartmann and Siegrist, 2017b).

## CONCLUSION

La consommation d'insectes est aujourd'hui très restreinte en Europe, car les freins actuels sont marqués, freins législatifs en lien avec un manque de connaissances scientifiques sur les risques, et barrière sociétale avec une acceptation limitée de l'entomophagie. Cependant, les enjeux écologiques, de productivité, nutritionnels et éthiques liés à nos modes de production et consommation actuels amènent de plus en plus les consommateurs et les pouvoirs publics à considérer cette alternative comme souhaitable pour une évolution plus durable de ces pratiques. La recherche se focalise aujourd'hui principalement sur l'étude des risques sanitaires liés à l'entomophagie car c'est un point critique pour le développement d'une production de masse d'insectes sans risques pour la santé de la population. Le risque allergique ne doit pas être négligé notamment pour les populations à risque augmenté (personnes allergiques à d'autres arthropodes) mais de manière plus générale, l'entomophagie est pratiquée de manière ancestrale dans des pays comme la Chine où aucun danger majeur n'y a été associé jusqu'à présent (Gao et al., 2018). La mise en place d'une législation sur la production d'insectes destinés à la consommation humaine au niveau européen permettrait de développer de manière contrôlée cette filière et ainsi de limiter les risques associés pour les consommateurs.

Avec l'évolution récente de la législation européenne facilitant la procédure « Novel Food », la possibilité qu'un dossier en faveur de l'entomophagie soit accepté laisse entrevoir un développement important de la production d'insectes en Europe, et notamment en France où il n'existe pas de politique de tolérance officielle. La population européenne étant de plus en plus au courant de l'impact de ses choix alimentaires sur l'environnement, mais aussi des qualités nutritionnelles des insectes, l'acceptabilité de l'entomophagie s'en trouve augmentée (Hartmann and Siegrist, 2016). Chaque personne est influencée par ce qui l'entoure, c'est donc un cercle vertueux qui pourrait se mettre en place avec l'autorisation officielle de la production d'insectes comestibles : cela permettrait d'augmenter la visibilité des insectes par la publicité mais aussi par leur disponibilité dans les supermarchés, les restaurants, les bars, ce qui les rendraient plus familiers et donc à termes acceptables pour le plus grand nombre.

Les débouchés de l'élevage d'insectes ne se limitent pas à l'entomophagie, et des entreprises françaises et européennes en général produisent des insectes depuis

plusieurs années pour nourrir des animaux d'élevage. L'utilisation d'insectes en alimentation animale présente des avantages majeurs en termes de durabilité, se démarquant face aux farines de poissons et produits à base de soja, le plus souvent issus de l'importation et de systèmes de production peu durables. Il est possible d'élever des insectes pour l'alimentation animale à partir de certains biodéchets, et ainsi d'associer le recyclage à une production de qualité nutritionnelle importante, ce qui à une échelle locale représente un système exemplaire du point de vue de la durabilité. Les études sur la réutilisation des déchets organiques se multiplient mais leur application reste limitée par la législation qui exclue certains éléments de l'alimentation des animaux d'élevage (fumiers notamment) (ANSES, 2015). Des avancées législatives sont aussi attendues pour étendre l'utilisation des insectes dans l'alimentation des porcs et des volailles, application jusqu'à présent non autorisée.

L'élevage d'insectes est une filière naissante qui s'appuie sur des connaissances anciennes mais qui se développe en permanence grâce à une recherche active notamment par les producteurs eux-mêmes en quête d'innovation, dynamique désormais encouragée par les pouvoirs publics. Alors sommes-nous prêts à intégrer réellement les insectes à notre consommation ? Ou bien voyons-nous uniquement ceux-ci comme acteurs du recyclage des déchets et aliments pour les animaux que nous consommons ?

**AGREMENT SCIENTIFIQUE**

**En vue de l'obtention du permis d'imprimer de la thèse de doctorat vétérinaire**

Je soussigné, **Pierre SANS**, Enseignant-chercheur, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, directeur de thèse, certifie avoir examiné la thèse de LANGLADE Fanny intitulée « **Utilisation des insectes en alimentation humaine : situation actuelle, enjeux et perspectives** » et que cette dernière peut être imprimée en vue de sa soutenance.



**Fait à Toulouse, le 20 décembre 2018**  
**Professeur Pierre SANS**  
**Enseignant chercheur**  
**de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse**



**Vu :**  
**Le Président du jury :**  
**Professeur Gérard CAMPISTRON**

Mlle LANGLADE Fanny  
a été admis(e) sur concours en : 2013  
a obtenu son diplôme d'études fondamentales vétérinaires le : 04/07/2017  
a validé son année d'approfondissement le : 11/12/2018  
n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.

Ecole nationale Vétérinaire- 23, chemin des capelles - 31076 Toulouse Cedex 3 - France

**Vu :**  
**La Directrice de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse**  
**Isabelle CHMITELIN**

Pour la Directrice et par délégation  
la Directrice de l'enseignement  
et de la vie étudiante

**Caroline LACROIX**



**Vu et autorisation de l'impression :**  
**Président de l'Université**  
**Paul Sabatier**  
**Monsieur Jean-Pierre VINEL**

Le Président de l'Université Paul Sabatier  
par délégation,  
La Vice-Présidente de la CFVU

**Régine ANDRE-OBRECHT**



## BIBLIOGRAPHIE

Adámková, A., Adámek, M., Mlček, J., Borkovcová, M., Bednářová, M., Kouřimská, L., Skácel, J., and Vítová, E. (2017). Welfare of the mealworm (*Tenebrio molitor*) breeding with regard to nutrition value and food safety. *Potravinarstvo* 11.

additifs-alimentaires.net (site internet). <http://www.additifs-alimentaires.net>.

AFPRAL (site internet). Site internet de l'AFPRAL (Association Française pour la Prévention des Allergies).

AFSCA, and CSS (2014). Avis commun du Comité Scientifique de l'AFSCA (Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire) 14-2014 et CSS (Conseil Supérieur de la Santé) n° 9160 : Sécurité alimentaire des insectes destinés à la consommation humaine.

Ai, H., Wang, F., Xia, Y., Chen, X., and Lei, C. (2012). Antioxidant, antifungal and antiviral activities of chitosan from the larvae of housefly, *Musca domestica* L. *Food Chemistry* 132, 493–498.

Alexander, P., Brown, C., Arneth, A., Dias, C., Finnigan, J., Moran, D., and Rounsevell, M.D.A. (2017). Could consumption of insects, cultured meat or imitation meat reduce global agricultural land use? *Global Food Security* 15, 22–32.

Anderson, S.J. (2000). Increasing calcium levels in cultured insects. *Zoo Biology* 19, 1–9.

ANSES (2015). AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à « la valorisation des insectes dans l'alimentation et l'état des lieux des connaissances scientifiques sur les risques sanitaires en lien avec la consommation des insectes ».

ANSES (2018). AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif au « Bien-être animal : contexte, définition et évaluation ».

ASEF (site internet). Les polluants organiques persistants - Synthèse de l'ASEF (Association Santé Environnement France).

Bailey, C.G., and Singh, N.B. (1977). An energy budget for *Mamestra configurata* (Lepidoptera : noctuidae). *The Canadian Entomologist* 109, 687–693.

Barnes, A.I., and Siva-Jothy, M.T. (2000). Density-dependent prophylaxis in the mealworm beetle *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae): cuticular melanization is an indicator of investment in immunity. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 267, 177–182.

Barron, A.B., and Klein, C. (2016). What insects can tell us about the origins of consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, 4900–4908.

Bastian, F.O. (2005). Spiroplasma as a Candidate Agent for the Transmissible Spongiform Encephalopathies: *Journal of Neuropathology and Experimental Neurology* 64, 833–838.

Bastian, F.O. (2014). The Case for Involvement of Spiroplasma in the Pathogenesis of Transmissible Spongiform Encephalopathies: *Journal of Neuropathology & Experimental Neurology* 73, 104–114.

Belluco, S., Losasso, C., Maggioletti, M., Alonzi, C.C., Paoletti, M.G., and Ricci, A. (2013). Edible Insects in a Food Safety and Nutritional Perspective: A Critical Review: Insects in a food perspective.... *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 12, 296–313.

Binder, M., Mahler, V., Hayek, B., Sperr, W.R., Scholler, M., Prozell, S., Wiedermann, G., Valent, P., Valenta, R., and Duchene, M. (2001). Molecular and Immunological Characterization of Arginine Kinase from the Indianmeal Moth, *Plodia interpunctella*, a Novel Cross-Reactive Invertebrate Pan-Allergen. *The Journal of Immunology* 167, 5470–5477.

Birch, J. (2017). Animal sentience and the precautionary principle. *Animal Sentience* 16.

Bjørge, J.D., Overgaard, J., Malte, H., Gianotten, N., and Heckmann, L.-H. (2018). Role of temperature on growth and metabolic rate in the tenebrionid beetles *Alphitobius diaperinus* and *Tenebrio molitor*. *Journal of Insect Physiology* 107, 89–96.

de Boer, J., Schösler, H., and Boersema, J.J. (2013). Motivational differences in food orientation and the choice of snacks made from lentils, locusts, seaweed or “hybrid” meat. *Food Quality and Preference* 28, 32–35.

Broekman, H., Knulst, A., den Hartog Jager, S., Monteleone, F., Gaspari, M., de Jong, G., Houben, G., and Verhoeckx, K. (2015). Effect of thermal processing on mealworm allergenicity. *Molecular Nutrition & Food Research* 59, 1855–1864.

Caparros Megido, R., Sablon, L., Geuens, M., Brostaux, Y., Alabi, T., Blecker, C., Drugmand, D., Haubruge, É., and Francis, F. (2014a). Edible Insects Acceptance by Belgian Consumers: Promising Attitude for Entomophagy Development: Could Belgian Consumers Accept Edible Insects? *Journal of Sensory Studies* 29, 14–20.

Caparros Megido, R., Sablon, L., Geuens, M., Brostaux, Y., Alabi, T., Blecker, C., Drugmand, D., Haubruge, É., and Francis, F. (2014b). Edible Insects Acceptance by Belgian Consumers: Promising Attitude for Entomophagy Development: Could Belgian Consumers Accept Edible Insects? *Journal of Sensory Studies* 29, 14–20.

Caparros Megido, R., Gierts, C., Blecker, C., Brostaux, Y., Haubruge, É., Alabi, T., and Francis, F. (2016). Consumer acceptance of insect-based alternative meat products in Western countries. *Food Quality and Preference* 52, 237–243.

Caparros Megido, R., Desmedt, S., Blecker, C., Béra, F., Haubruge, É., Alabi, T., and Francis, F. (2017). Microbiological Load of Edible Insects Found in Belgium. *Insects* 8, 12.

Caparros Megido, R., Poelaert, C., Ernens, M., Liotta, M., Blecker, C., Danthine, S., Tyteca, E., Haubruge, É., Alabi, T., Bindelle, J., et al. (2018). Effect of household cooking techniques on the microbiological load and the nutritional quality of mealworms (*Tenebrio molitor*). *Food Research International* 106, 503–508.

Chai, J.-Y., Shin, E.-H., Lee, S.-H., and Rim, H.-J. (2009). Foodborne Intestinal Flukes in Southeast Asia. *The Korean Journal of Parasitology* 47, S69.

Churchward-Venne, T.A., Pinckaers, P.J.M., van Loon, J.J.A., and van Loon, L.J.C. (2017). Consideration of insects as a source of dietary protein for human consumption. *Nutrition Reviews* 75, 1035–1045.

Cirad (2007). Les criquets ravageurs - locustcirad.fr.

CIVAM Bretagne (2010). Les bovins à l'herbe émettent-ils vraiment plus de méthane ? Synthèse bibliographique 2010 - Plan d'action Agriculture Durable des CIVAM de Bretagne.

Clarkson, C., Miroso, M., and Birch, J. (2018). Consumer acceptance of insects and ideal product attributes. *British Food Journal* 120, 2898–2911.

Clifford, C.W., and Woodring, J.P. (1990). Methods for rearing the house cricket, *Acheta domesticus* (L.), along with baseline values for feeding rates, growth rates, development times, and blood composition. *Journal of Applied Entomology* 109, 1–14.

Collavo, A., Glew, R.H., Huang, Y.-S., Chuang, L.-T., Bosse, R., and Paoletti, M.G. (2005). House Cricket Small-scale Farming. 27.

Commission Européenne (2017). RÈGLEMENT (UE) 2017/ 893 DE LA COMMISSION - du 24 mai 2017 - modifiant les annexes I et IV du règlement (CE) no 999/ 2001 du Parlement européen et du Conseil et les annexes X, XIV et XV du règlement (UE) no 142/ 2011 de la Commission concernant les dispositions relatives aux protéines animales transformées. 25.

Contreras-Garduño, J., Lanz-Mendoza, H., Franco, B., Nava, A., Pedraza-Reyes, M., and Canales-Lazcano, J. (2016). Insect immune priming: ecology and experimental evidences: Immune priming in invertebrates. *Ecological Entomology* 41, 351–366.

DeFoliart, G. (1991). Insect Fatty Acids: Similar to Those of Poultry and Fish in Their Degree of Unsaturation, but Higher in the Polyunsaturates. *The Food Insect Newsletter*.

DESIRABLE (site internet). Projet Désirable.

Dubuisson, C., Martin, A., and La Vieille, S. (2002). Allergies alimentaires - Etat des lieux et propositions d'orientations. afssa- Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments 104.

Dufossé, L. (2014). Anthraquinones, the Dr Jekyll and Mr Hyde of the food pigment family. *Food Research International* 65, 132–136.

Duncan, F.D., Krasnov, B., and McMaster, M. (2002). Metabolic rate and respiratory gas-exchange patterns in tenebrionid beetles from the Negrev Highlands, Israel. *The Journal of Experimental Biology* 791–798.

Dunford, J.C., and Kaufman, P.E. (2006). The lesser mealworm - Featured creatures - Entomology & Nematology - University of Florida.

(EC)1441/2007 (2007). COMMISSION REGULATION (EC) No 1441/2007 of 5 December 2007 amending Regulation (EC) No 2073/2005 on microbiological criteria for foodstuffs.

EFSA Scientific Committee (2015). Risk profile related to production and consumption of insects as food and feed: Risk profile of insects as food and feed. *EFSA Journal* 13, 4257.

Eilenberg, J., Vlak, J.M., Nielsen-LeRoux, C., Cappelozza, S., and Jensen, A.B. (2015). Diseases in insects produced for food and feed. *Journal of Insects as Food and Feed* 1, 87–102.

Eisemann, C.H., Jorgensen, W.K., Merritt, D.J., Rice, M.J., Cribb, B.W., Webb, P.D., and Zalucki, M.P. (1984). Do insects feel pain? — A biological view. *Experientia* 40, 164–167.

Elwood, R.W. (2011). Pain and Suffering in Invertebrates? *ILAR Journal* 52, 175–184.

Entomo farm (site internet). Entomo Farm - Natural Insect Material Producer - France. Consulté à l'adresse : <http://entomo.farm/>.

Evison, S.E.F., Gallagher, J.D., Thompson, J.J.W., Siva-Jothy, M.T., and Armitage, S.A.O. (2017). Cuticular colour reflects underlying architecture and is affected by a limiting resource. *Journal of Insect Physiology* 98, 7–13.

FAO, (Food and Agricultural organization of the United Nations) (2006). Livestock's long shadow: environmental issues and options.

FAO, (Food and Agricultural organization of the United Nations) (2016). Elevages et changements climatiques - Action de la FAO face au changement climatique.

FAO, (Food and Agricultural organization of the United Nations), and Van Huis, A. (2013). Edible insects: future prospects for food and feed security (Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations).

FAO, Vantomme, P., and Ayeiko, M. (2013). The contribution of insects to food security, livelihoods and the environment - Food and Agriculture Organization of the United Nations. 4.

Faulkner, W.B., and Shaw, B.W. (2008). Review of ammonia emission factors for United States animal agriculture. *Atmospheric Environment* 42, 6567–6574.

van der Fels-Klerx, H.J., Camenzuli, L., Van der Lee, M.K., and Oonincx, D.G.A.B. (2016). Uptake of Cadmium, Lead and Arsenic by *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens* from Contaminated Substrates. *PLOS ONE* 11, e0166186.

FFPIDI (site internet). FFPIDI - Fédération Française des Producteurs, Importateurs et Distributeurs d'Insectes. Consulté à l'adresse : <http://www.ffpidi.org/>.

Finke, M.D. (2002). Complete nutrient composition of commercially raised invertebrates used as food for insectivores. *Zoo Biology* 21, 269–285.

Fischer, A.R.H., and Steenbekkers, L.P.A. (Bea) (2018). All insects are equal, but some insects are more equal than others. *British Food Journal* 120, 852–863.

Flachowsky, G., Meyer, U., and Südekum, K.-H. (2017). Land Use for Edible Protein of Animal Origin—A Review. *Animals* 7, 25.

Fogang Mba, A.R., Kansci, G., Viau, M., Hafnaoui, N., Meynier, A., Demmano, G., and Genot, C. (2017). Lipid and amino acid profiles support the potential of *Rhynchophorus phoenicis* larvae for human nutrition. *Journal of Food Composition and Analysis* 60, 64–73.

Fombong, F., Van Der Borght, M., and Vanden Broeck, J. (2017). Influence of Freeze-Drying and Oven-Drying Post Blanching on the Nutrient Composition of the Edible Insect *Ruspolia differens*. *Insects* 8, 102.

Francardi, V., Frosinini, R., Pichini, C., Botta, M., Cito, A., and Dreassi, E. (2017). *Galleria Mellonella* (Lepidoptera Pyralidae): An Edible Insect of Nutraceutical Interest. *Redia* 187–192.

Gallen, S., and Pantin-Sohier, G. (2015). La comestibilité des insectes : étude exploratoire chez les jeunes consommateurs français. HAL - Archives Ouvertes.

Gao, Y., Wang, D., Xu, M.-L., Shi, S.-S., and Xiong, J.-F. (2018). Toxicological characteristics of edible insects in China: A historical review. *Food and Chemical Toxicology* 119, 237–251.

Garofalo, C., Osimani, A., Milanović, V., Taccari, M., Cardinali, F., Aquilanti, L., Riolo, P., Ruschioni, S., Isidoro, N., and Clementi, F. (2017). The microbiota of marketed processed edible insects as revealed by high-throughput sequencing. *Food Microbiology* 62, 15–22.

de Gier, S., and Verhoeckx, K. (2018). Insect (food) allergy and allergens. *Molecular Immunology* 100, 82–106.

Gmuer, A., Nuessli Guth, J., Hartmann, C., and Siegrist, M. (2016). Effects of the degree of processing of insect ingredients in snacks on expected emotional experiences and willingness to eat. *Food Quality and Preference* 54, 117–127.

Gouveia, S.M., Simpson, S.T., eph. J., Raubenheimer, D., and Zanotto, F.P. (2000). Patterns of respiration in *Locusta migratoria* nymphs when feeding. *Physiological Entomology* 25, 88–93.

Grabowski, N.T., and Klein, G. (2017a). Microbiology of cooked and dried edible Mediterranean field crickets (*Gryllus bimaculatus*) and superworms (*Zophobas atratus*) submitted to four different heating treatments. *Food Science and Technology International* 23, 17–23.

Grabowski, N.T., and Klein, G. (2017b). Microbiology of processed edible insect products – Results of a preliminary survey. *International Journal of Food Microbiology* 243, 103–107.

Graczyk, T.K., Knight, R., and Tamang, L. (2005). Mechanical Transmission of Human Protozoan Parasites by Insects. *Clinical Microbiology Reviews* 18, 128–132.

Grau, T., Vilcinskas, A., and Joop, G. (2017). Sustainable farming of the mealworm *Tenebrio molitor* for the production of food and feed. *Zeitschrift Für Naturforschung C* 72, 337–349.

- Hackstein, J.H.P., and Stumm, C.K. (1994). Methane Production in Terrestrial Arthropods. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 91, 5441–5445.
- Hall, F., Johnson, P.E., and Liceaga, A. (2018). Effect of enzymatic hydrolysis on bioactive properties and allergenicity of cricket (*Gryllobates sigillatus*) protein. *Food Chemistry* 262, 39–47.
- Hartmann, C., and Siegrist, M. (2016). Becoming an insectivore: Results of an experiment. *Food Quality and Preference* 51, 118–122.
- Hartmann, C., and Siegrist, M. (2017a). Insects as food: perception and acceptance - Findings from current research. *Ernährungs Umschau* 44–50.
- Hartmann, C., and Siegrist, M. (2017b). Consumer perception and behaviour regarding sustainable protein consumption: A systematic review. *Trends in Food Science & Technology* 61, 11–25.
- Hoek, A.C., Elzerman, J.E., Hageman, R., Kok, F.J., Luning, P.A., and Graaf, C. de (2013). Are meat substitutes liked better over time? A repeated in-home use test with meat substitutes or meat in meals. *Food Quality and Preference* 28, 253–263.
- Houbraken, M., Spranghers, T., De Clercq, P., Cooreman-Algoed, M., Couchement, T., De Clercq, G., Verbeke, S., and Spanoghe, P. (2016). Pesticide contamination of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) for human consumption. *Food Chemistry* 201, 264–269.
- House, J. (2016). Consumer acceptance of insect-based foods in the Netherlands: Academic and commercial implications. *Appetite* 107, 47–58.
- van Huis, A. (2013). Potential of Insects as Food and Feed in Assuring Food Security. *Annual Review of Entomology* 58, 563–583.
- van Huis, A. (2016). Edible insects are the future? *Proceedings of the Nutrition Society* 75, 294–305.
- Hyun, S.-H., Kwon, K.H., Park, K.-H., Jeong, H.C., Kwon, O., Tindwa, H., and Han, Y.S. (2012). Evaluation of nutritional status of an edible grasshopper, *Oxya chinensis formosana*: Nutritional status of an edible grasshopper. *Entomological Research* 42, 284–290.
- Im, A.-R., Yang, W.-K., Park, Y.-C., Kim, S., and Chae, S. (2018). Hepatoprotective effects of insect extracts in an animal model of nonalcoholic fatty liver disease. *Nutrients* 10, 735.
- insectescomestibles.fr (site internet). Site de vente des marques Insectéo et Kindjao. Consulté à l'adresse : <https://www.insectescomestibles.fr/>.
- Jensen-Jarolim, E., Pali-Schöll, I., Jensen, S.A.F., Robibaro, B., and Kinaciyan, T. (2015). Caution: Reptile pets shuttle grasshopper allergy and asthma into homes. *World Allergy Organization Journal* 8, 1–5.
- Ji, K., Chen, J., Li, M., Liu, Z., Wang, C., Zhan, Z., Wu, X., and Xia, Q. (2009). Anaphylactic shock and lethal anaphylaxis caused by food consumption in China. *Trends in Food Science & Technology* 20, 227–231.

- Kim, H.-M., Kim, J.-N., Kim, J.-S., Jeong, M.-Y., Yun, E.-Y., Hwang, J.-S., and Kim, A.-J. (2015a). Quality Characteristics of Patty Prepared with Mealworm Powder. *The Korean Journal of Food And Nutrition* 28, 813–820.
- Kim, H.-W., Setyabrata, D., Lee, Y., Jones, O.G., and Kim, Y.H.B. (2017). Effect of House Cricket (*Acheta domesticus*) Flour Addition on Physicochemical and Textural Properties of Meat Emulsion Under Various Formulations: Effect of cricket flour on meat emulsion. *Journal of Food Science* 82, 2787–2793.
- Kim, S.Y., Kim, H.G., Song, S.H., and Kim, N.J. (2015b). Developmental characteristics of *Zophobas atratus* (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae in different instars. *International Journal of Industrial Entomology* 30, 45–49.
- Kim, S.Y., Park, J.B., Lee, Y.B., Yoon, H.J., Lee, K.Y., and Kim, N.J. (2015c). Growth characteristics of mealworm *Tenebrio molitor*. *Journal of Sericultural and Entomological Science* 53, 1–5.
- Klunder, H.C., Wolkers-Rooijackers, J., Korpela, J.M., and Nout, M.J.R. (2012). Microbiological aspects of processing and storage of edible insects. *Food Control* 26, 628–631.
- Lee, K.P., Simpson, S.J., and Wilson, K. (2008). Dietary Protein-Quality Influences Melanization and Immune Function in an Insect. *Functional Ecology* 22, 1052–1061.
- Lensvelt, E.J.S., and Steenbekkers, L.P.A. (2014). Exploring Consumer Acceptance of Entomophagy: A Survey and Experiment in Australia and the Netherlands. *Ecology of Food and Nutrition* 53, 543–561.
- Li, L., Zhao, Z., and Liu, H. (2013). Feasibility of feeding yellow mealworm (*Tenebrio molitor* L.) in bioregenerative life support systems as a source of animal protein for humans. *Acta Astronautica* 92, 103–109.
- Lis, Ł., Bakula, T., Baranowski, M., and Czarnewicz, A. (2011). The carcinogenic effects of benzoquinones produced by the flour beetle. *Polish Journal of Veterinary Sciences* 14.
- Liu, Z., Xia, L., Wu, Y., Xia, Q., Chen, J., and Roux, K.H. (2009). Identification and Characterization of an Arginine Kinase as a Major Allergen from Silkworm (*Bombyx mori*) Larvae. *International Archives of Allergy and Immunology* 150, 8–14.
- Looy, H., and Wood, J.R. (2006). Attitudes Toward Invertebrates: Are Educational “Bug Banquets” Effective? *The Journal of Environmental Education* 37, 37–48.
- Looy, H., Dunkel, F.V., and Wood, J.R. (2014). How then shall we eat? Insect-eating attitudes and sustainable foodways. *Agriculture and Human Values* 31, 131–141.
- Lundy, M.E., and Parrella, M.P. (2015). Crickets Are Not a Free Lunch: Protein Capture from Scalable Organic Side-Streams via High-Density Populations of *Acheta domesticus*. *PLOS ONE* 10, e0118785.
- Lupi, O. (2003). Could ectoparasites act as vectors for prion diseases? Center for Vaccine Development, University of Texas Medical Branch at Galveston (UTMB), Galveston, TX, USA.

- Lupi, O. (2005). Risk analysis of ectoparasites acting as vectors for chronic wasting disease. *Medical Hypotheses* 65, 47–54.
- Maciel-Vergara, G., and Ros, V.I.D. (2017). Viruses of insects reared for food and feed. *Journal of Invertebrate Pathology* 147, 60–75.
- Makkar, H.P.S., Tran, G., Heuzé, V., and Ankers, P. (2014). State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology* 197, 1–33.
- Mariod, A.A., and Fadul, H. (2015). Extraction and characterization of gelatin from two edible Sudanese insects and its applications in ice cream making. *Food Science and Technology International* 21, 380–391.
- Mekonnen, M.M., and Hoekstra, A.Y. (2012). A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems* 15, 401–415.
- Miglietta, P., De Leo, F., Ruberti, M., and Massari, S. (2015). Mealworms for Food: A Water Footprint Perspective. *Water* 7, 6190–6203.
- Moriarty, M.M., Koch, I., Gordon, R.A., and Reimer, K.J. (2009). Arsenic Speciation of Terrestrial Invertebrates. *Environmental Science & Technology* 43, 4818–4823.
- Mutatec (site internet). Mutatec – Bioconversion by Insects. Consulté à l'adresse : <http://mutatec.com/>.
- Mwangi, M.N., Oonincx, D.G.A.B., Stouten, T., Veenenbos, M., Melse-Boonstra, A., Dicke, M., and van Loon, J.J.A. (2018). Insects as sources of iron and zinc in human nutrition. *Nutrition Research Reviews* 31, 248–255.
- Nakagaki, B.J., and Defoliart, G.R. (1991). 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. *Journal of Economic Entomology* 84, 891–896.
- NextAlim (site internet). NextAlim - Producteurs d'insectes pour l'alimentation animale. Consulté à l'adresse : <http://www.nextalim.com/>.
- Nishimune, T., Watanabe, Y., Okazaki, H., and Akai, H. (2000). Thiamin Is Decomposed Due to *Anopheles* spp. Entomophagy in Seasonal Ataxia Patients in Nigeria. *The Journal of Nutrition* 130, 1625–1628.
- Nordentoft, S., Cederberg, T.L., Fischer, C.H., and Bjerrum, L. (2014). Accumulation of dioxins and PCB in house fly larvae (*Musca domestica*) reared in poultry manure and used in feed for organic laying hens. *Proceedings of the 34th International Symposium on Halogenated Persistent Organic Pollutants*.
- Note de service DGAL (2017). Note de service DGAL/SDSPA/2017-860 du 27/10/2017 : Utilisation des protéines et autres produits dérivés d'insectes dans l'alimentation humaine, animale et pour des usages techniques.
- Nowak, V., Persijn, D., Rittenschober, D., and Charrondiere, U.R. (2016). Review of food composition data for edible insects. *Food Chemistry* 193, 39–46.
- OIE (site internet). Site web de l'OIE - Organisation mondiale de la santé animale.

- Oonincx, D.G.A.B., and de Boer, I.J.M. (2012). Environmental Impact of the Production of Mealworms as a Protein Source for Humans – A Life Cycle Assessment. *PLoS ONE* 7, e51145.
- Oonincx, D.G.A.B., and van der Poel, A.F.B. (2010). Effects of diet on the chemical composition of migratory locusts (*Locusta migratoria*). *Zoo Biology* 30, 9–16.
- Oonincx, D.G.A.B., Van Itterbeeck, J., Heetkamp, M.J.W., van den Brand, H., van Loon, J.J.A., and van Huis, A. (2010). An Exploration on Greenhouse Gas and Ammonia Production by Insect Species Suitable for Animal or Human Consumption. *PLoS ONE* 5, e14445.
- Oonincx, D.G.A.B., van Broekhoven, S., van Huis, A., and van Loon, J.J.A. (2015). Feed Conversion, Survival and Development, and Composition of Four Insect Species on Diets Composed of Food By-Products. *PLOS ONE* 10, e0144601.
- Osimani, A., Garofalo, C., Milanović, V., Taccari, M., Cardinali, F., Aquilanti, L., Pasquini, M., Mozzon, M., Raffaelli, N., Ruschioni, S., et al. (2017). Insight into the proximate composition and microbial diversity of edible insects marketed in the European Union. *European Food Research and Technology* 243, 1157–1171.
- Osimani, A., Milanović, V., Cardinali, F., Garofalo, C., Clementi, F., Pasquini, M., Riolo, P., Ruschioni, S., Isidoro, N., Loreto, N., et al. (2018a). The bacterial biota of laboratory-reared edible mealworms (*Tenebrio molitor* L.): From feed to frass. *International Journal of Food Microbiology* 272, 49–60.
- Osimani, A., Milanović, V., Garofalo, C., Cardinali, F., Roncolini, A., Sabbatini, R., De Filippis, F., Ercolini, D., Gabucci, C., Petruzzelli, A., et al. (2018b). Revealing the microbiota of marketed edible insects through PCR-DGGE, metagenomic sequencing and real-time PCR. *International Journal of Food Microbiology* 276, 54–62.
- Pali-Schöll, I., Binder, R., Moens, Y., Polesny, F., and Monsó, S. (2018). Edible insects – defining knowledge gaps in biological and ethical considerations of entomophagy. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 1–12.
- Pambo, K.O., Okello, J.J., Mbeche, R.M., Kinyuru, J.N., and Alemu, M.H. (2018). The role of product information on consumer sensory evaluation, expectations, experiences and emotions of cricket-flour-containing buns. *Food Research International* 106, 532–541.
- Park, J.B., Choi, W.H., Kim, S.H., Jin, H.J., Han, Y.S., Lee, Y.S., and Kim, N.J. (2014). Developmental characteristics of *Tenebrio molitor* larvae (Coleoptera: Tenebrionidae) in different instars. *International Journal of Industrial Entomology* 28, 5–9.
- Park, Y.-S., Choi, Y.-S., Hwang, K.-E., Kim, T.-K., Lee, C.-W., Shin, D.-M., and Han, S.G. (2017). Physicochemical properties of meat batter added with edible silkworm pupae (*Bombyx mori*) and transglutaminase. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources* 37, 351–359.
- Parlement Européen (2017). Le bien-être animal dans l'Union européenne - Direction Générale des politiques internes - Département thématique C : Droits des citoyens et Affaires constitutionnelles. 88.

Payne, C.L.R., Scarborough, P., Rayner, M., and Nonaka, K. (2016). Are edible insects more or less 'healthy' than commonly consumed meats? A comparison using two nutrient profiling models developed to combat over- and undernutrition. *European Journal of Clinical Nutrition* 70, 285–291.

Pereira, K.S., Schmidt, F.L., Barbosa, R.L., Guaraldo, A.M.A., Franco, R.M.B., Dias, V.L., and Passos, L.A.C. (2010). Transmission of chagas disease (American trypanosomiasis) by food. *Advances in Food and Nutrition Research* 59, 63–85.

Philibert, T., Lee, B.H., and Fabien, N. (2017). Current status and new perspectives on chitin and chitosan as functional biopolymers. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 181, 1314–1337.

Pleissner, D., and Rumpold, B.A. (2018). Utilization of organic residues using heterotrophic microalgae and insects. *Waste Management* 72, 227–239.

Poma, G., Cuykx, M., Amato, E., Calaprice, C., Focant, J.F., and Covaci, A. (2017). Evaluation of hazardous chemicals in edible insects and insect-based food intended for human consumption. *Food and Chemical Toxicology* 100, 70–79.

Purschke, B., Tanzmeister, H., Meinlschmidt, P., Baumgartner, S., Lauter, K., and Jäger, H. (2018). Recovery of soluble proteins from migratory locust ( *Locusta migratoria* ) and characterisation of their compositional and techno-functional properties. *Food Research International* 106, 271–279.

Ramos-Elorduy, J. (2008). Energy supplied by edible insects from Mexico and their nutritional and ecological importance. *Ecology of Food and Nutrition* 47, 280–297.

Rasmussen, R.A., and Khalil, M. a. K. (1983). Global production of methane by termites. *Nature* 301, 700–702.

Recommendations WHO/FAO/ONU (2007). Protein and amino acid requirements in human nutrition: report of a joint WHO/FAO/ONU Expert Consultation. WHO Technical Report Series.

Reverberi, M. (2017). Exploring the legal status of edible insects around the world.

Ridoutt, B.G., Sanguansri, P., Freer, M., and Harper, G.S. (2012). Water footprint of livestock: comparison of six geographically defined beef production systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17, 165–175.

Ritter, K.S. (1990). Cholesterol and insects. *The Food Insect Newsletter*.

Rosner, P.-M., Hocquette, J.-F., and Peyraud, J.-L. (2016). Les connaissances scientifiques peuvent-elles remettre en cause la légitimité de manger de la viande ? 5.

Ruby, M.B., Rozin, P., and Chan, C. (2015). Determinants of willingness to eat insects in the USA and India. *Journal of Insects as Food and Feed* 1, 215–225.

Rumpold, B.A., and Schlüter, O.K. (2013). Nutritional composition and safety aspects of edible insects. *Molecular Nutrition & Food Research* 57, 802–823.

Rumpold, B.A., Fröhling, A., Reineke, K., Knorr, D., Boguslawski, S., Ehlbeck, J., and Schlüter, O. (2014). Comparison of volumetric and surface decontamination

techniques for innovative processing of mealworm larvae (*Tenebrio molitor*). *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 26, 232–241.

Saeed, T., Abu Dagga, F., and Saraf, M. (1993). Analysis of residual pesticides present in edible locusts captured in Kuwait. *Arab Gulf Journal of Scientific Research* 1–5.

Scarborough, P., Appleby, P.N., Mizdrak, A., Briggs, A.D.M., Travis, R.C., Bradbury, K.E., and Key, T.J. (2014). Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK. *Climatic Change* 125, 179–192.

Schlüter, O., Rumpold, B., Holzhauser, T., Roth, A., Vogel, R.F., Quasigroch, W., Vogel, S., Heinz, V., Jäger, H., Bandick, N., et al. (2017). Safety aspects of the production of foods and food ingredients from insects. *Molecular Nutrition & Food Research* 61, 1600520.

Schösler, H., Boer, J. de, and Boersema, J.J. (2012). Can we cut out the meat of the dish? Constructing consumer-oriented pathways towards meat substitution. *Appetite* 58, 39–47.

Schouteten, J.J., De Steur, H., De Pelsmaeker, S., Lagast, S., Juvinal, J.G., De Bourdeaudhuij, I., Verbeke, W., and Gellynck, X. (2016). Emotional and sensory profiling of insect-, plant- and meat-based burgers under blind, expected and informed conditions. *Food Quality and Preference* 52, 27–31.

Sehgal, R., Bhatti, H.P.S., Bhasin, D.K., Sood, A.K., Nada, R., Malla, N., and Singh, K. (2002). Intestinal Myiasis Due to *Musca domestica*: A Report of Two Cases. 3.

Shantibala, T., Lokeshwari, R.K., and Debaraj, H. (2014). Nutritional and Antinutritional Composition of the Five Species of Aquatic Edible Insects Consumed in Manipur, India. *Journal of Insect Science* 14, 1–10.

Siegrist, M., Visschers, V.H.M., and Hartmann, C. (2015). Factors influencing changes in sustainability perception of various food behaviors: Results of a longitudinal study. *Food Quality and Preference* 46, 33–39.

Smetana, S., Mathys, A., Knoch, A., and Heinz, V. (2015). Meat alternatives: life cycle assessment of most known meat substitutes. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20, 1254–1267.

Smetana, S., Palanisamy, M., Mathys, A., and Heinz, V. (2016). Sustainability of insect use for feed and food: Life Cycle Assessment perspective. *Journal of Cleaner Production* 137, 741–751.

Sogari, G., Menozzi, D., and Mora, C. (2017). Exploring young foodies' knowledge and attitude regarding entomophagy: A qualitative study in Italy. *International Journal of Gastronomy and Food Science* 7, 16–19.

Stanhope, J., Carver, S., and Weinstein, P. (2015). The risky business of being an entomologist: A systematic review. *Environmental Research* 140, 619–633.

Stoops, J., Crauwels, S., Waud, M., Claes, J., Lievens, B., and Van Campenhout, L. (2016). Microbial community assessment of mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) and grasshoppers (*Locusta migratoria migratorioides*) sold for human consumption. *Food Microbiology* 53, 122–127.

- Tan, H.S.G., van den Berg, E., and Stieger, M. (2016a). The influence of product preparation, familiarity and individual traits on the consumer acceptance of insects as food. *Food Quality and Preference* 52, 222–231.
- Tan, H.S.G., Fischer, A.R.H., van Trijp, H.C.M., and Stieger, M. (2016b). Tasty but nasty? Exploring the role of sensory-liking and food appropriateness in the willingness to eat unusual novel foods like insects. *Food Quality and Preference* 48, 293–302.
- Tan, H.S.G., Verbaan, Y.T., and Stieger, M. (2017). How will better products improve the sensory-liking and willingness to buy insect-based foods? *Food Research International* 92, 95–105.
- Terrien, C. (2018). Les substituts protéiques disponibles - Les insectes. In *La Consommation de Viande et Ses Substituts - Enjeux, Acceptabilité et Évolution*, pp. 89–95.
- Tiencheu, B., Womeni, H.M., Linder, M., Mbiapo, F.T., Villeneuve, P., Fanni, J., and Parmentier, M. (2013). Changes of lipids in insect (*Rhynchophorus phoenicis*) during cooking and storage. *European Journal of Lipid Science and Technology* 115, 186–195.
- Tomasik, B. (2017). Do Bugs Feel Pain? Consulté à l'adresse : <https://reducing-suffering.org/do-bugs-feel-pain/>.
- Urs, K.C.D., and Hopkins, T.L. (1973). Effect of moisture on the lipid content and composition of two strains of *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera, Tenebrionidae). *Journal of Stored Products Research* 8, 299–305.
- Van Broekhoven, S., Oonincx, D.G.A.B., van Huis, A., and van Loon, J.J.A. (2015). Growth performance and feed conversion efficiency of three edible mealworm species (Coleoptera: Tenebrionidae) on diets composed of organic by-products. *Journal of Insect Physiology* 73, 1–10.
- Van Broekhoven, S., Bastiaan-Net, S., de Jong, N.W., and Wichers, H.J. (2016). Influence of processing and in vitro digestion on the allergic cross-reactivity of three mealworm species. *Food Chemistry* 196, 1075–1083.
- Van Dooremalen, C., and Eilers, J. (2010). A moderate change in temperature induces changes in fatty acid composition of storage and membrane lipids in a soil arthropod. *Journal of Insect Physiology* 56, 178–184.
- Vandeweyer, D., Crauwels, S., Lievens, B., and Van Campenhout, L. (2017a). Microbial counts of mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) and crickets (*Acheta domesticus* and *Grylodes sigillatus*) from different rearing companies and different production batches. *International Journal of Food Microbiology* 242, 13–18.
- Vandeweyer, D., Crauwels, S., Lievens, B., and Van Campenhout, L. (2017b). Metagenetic analysis of the bacterial communities of edible insects from diverse production cycles at industrial rearing companies. *International Journal of Food Microbiology* 261, 11–18.
- Vandeweyer, D., Lenaerts, S., Callens, A., and Van Campenhout, L. (2017c). Effect of blanching followed by refrigerated storage or industrial microwave drying on the

microbial load of yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*). *Food Control* 71, 311–314.

Vandeweyer, D., Wynants, E., Crauwels, S., Verreth, C., Viaene, N., Claes, J., Lievens, B., and Van Campenhout, L. (2018). Microbial Dynamics during Industrial Rearing, Processing, and Storage of Tropical House Crickets (*Gryllobates sigillatus*) for Human Consumption. *Applied and Environmental Microbiology* 84.

Vanhonacker, F., Van Loo, E.J., Gellynck, X., and Verbeke, W. (2013). Flemish consumer attitudes towards more sustainable food choices. *Appetite* 62, 7–16.

Verbeke, W. (2015). Profiling consumers who are ready to adopt insects as a meat substitute in a Western society. *Food Quality and Preference* 39, 147–155.

Verneau, F., La Barbera, F., Kolle, S., Amato, M., Del Giudice, T., and Grunert, K. (2016). The effect of communication and implicit associations on consuming insects: An experiment in Denmark and Italy. *Appetite* 106, 30–36.

Wilkinson, J.M. (2011). Re-defining efficiency of feed use by livestock. *Animal* 5, 1014–1022.

Wilkinson, K., Muhlhausler, B., Motley, C., Crump, A., Bray, H., and Ankeny, R. (2018). Australian consumers' awareness and acceptance of insects as food. *Insects* 9, 44.

WUR (2018). Répertoire des principaux insectes comestibles - Publication de l'Université Wageningen en lien avec l'ouvrage : *Insects as Food and Feed : from production to consumption*.

Wynants, E., Crauwels, S., Lievens, B., Luca, S., Claes, J., Borremans, A., Bruyninckx, L., and Van Campenhout, L. (2017). Effect of post-harvest starvation and rinsing on the microbial numbers and the bacterial community composition of mealworm larvae (*Tenebrio molitor*). *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 42, 8–15.

Wynants, E., Crauwels, S., Verreth, C., Gianotten, N., Lievens, B., Claes, J., and Van Campenhout, L. (2018). Microbial dynamics during production of lesser mealworms (*Alphitobius diaperinus*) for human consumption at industrial scale. *Food Microbiology* 70, 181–191.

Xu, S., Gu, M., Liu, X., and Yang, L. (2015). Experimental Population Life Table of *Tenebrio molitor* at Different Temperatures - *Journal of Henan Agricultural Sciences*.

Yang, Y., Tang, L., Tong, L., Liu, Y., Liu, H., and Li, X. (2010). Initial ground experiments of silkworm cultures living on different feedstock for provision of high quality animal protein for human in space. *Advances in Space Research* 46, 707–711.

Yi, L., Lakemond, C.M.M., Sagis, L.M.C., Eisner-Schadler, V., van Huis, A., and van Boekel, M.A.J.S. (2013). Extraction and characterisation of protein fractions from five insect species. *Food Chemistry* 141, 3341–3348.

Ynsect (site internet). Ynsect, Premium Natural Feed. Consulté à l'adresse : <https://www.ynsect.com/fr/>.

Yoon, Y.-I., Chung, M., Hwang, J.-S., Han, M., Goo, T.-W., and Yun, E.-Y. (2015). *Allomyrina dichotoma* (Arthropoda: Insecta) Larvae Confer Resistance to Obesity in Mice Fed a High-Fat Diet. *Nutrients* 7, 1978–1991.

Zagrobelny, M., Dreon, A.L., Gomiero, T., Marcazzan, G.L., Glaring, M.A., Møller, B.L., and Paoletti, M.G. (2009). Toxic Moths: Source of a Truly Safe Delicacy. *Journal of Ethnobiology* 29, 64–76.

Zielińska, E., Baraniak, B., Karaś, M., Rybczyńska, K., and Jakubczyk, A. (2015). Selected species of edible insects as a source of nutrient composition. *Food Research International* 77, 460–466.

Zou, Y., Hu, T., Shi, Y., Liao, S., Liu, J., Mu, L., and Chen, C.-Y.O. (2017). Silkworm pupae oil exerts hypercholesterolemic and antioxidant effects in high-cholesterol diet-fed rats: Silkworm pupae oil with hypercholesterolemic and antioxidant effects. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 97, 2050–2056.

TOULOUSE 2018

NOM : LANGLADE

PRENOM : Fanny

TITRE : UTILISATION DES INSECTES EN ALIMENTATION HUMAINE – SITUATION ACTUELLE, ENJEUX ET PERSPECTIVES.

RESUME : La consommation d'insectes récoltés dans le milieu naturel est pratiquée de manière ancestrale et encore aujourd'hui sur plusieurs continents. Le développement de l'élevage d'insectes est plus récent mais pourrait répondre aux grands enjeux actuels, incluant productivité, durabilité et réponse aux besoins nutritionnels. Cependant, les risques sanitaires associés à l'entomophagie sont mal connus, et la législation européenne ne permet pas encore la production d'insectes pour la consommation humaine. La faible acceptation des insectes comestibles par les européens constitue aussi un frein au développement de l'entomophagie, et comprendre le phénomène est essentiel pour permettre l'essor de cette pratique. En janvier 2018, la législation européenne a évolué vers une simplification des démarches administratives, et au vu du développement considérable des connaissances scientifiques sur le sujet et de barrières psychologiques à priori surmontables, l'accroissement de la production d'insectes et de l'entomophagie en Europe est envisageable.

MOTS-CLES : alimentation, insectes, entomophagie, environnement, éthique, risques, santé, acceptation sociale

TITLE: INSECTS FOR FOOD IN EUROPE - CURRENT SITUATION, CONCERNS AND PROSPECTS

ABSTRACT: Insects harvested from the wild are traditionally consumed by people from several continents. The development of insect farming is more recent but could respond to major current issues, including productivity, sustainability and nutritional needs. However, the risks to human health associated with entomophagy are poorly known, and European legislation does not yet allow the production of insects for food. The low acceptance of edible insects by European people is also a hindrance to the development of such practice. In January 2018, the European legislation evolved towards a simplification of the administrative procedures, and in view of the substantial development of the scientific knowledge on the subject and psychological barriers which can be overcome, the increase of the production of insects and entomophagy in Europe is foreseeable.

KEYWORDS: food, insects, entomophagy, environment, ethics, risks, health, consumer acceptance