



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

UNIVERSITE DE LORRAINE

2013

FACULTE DE PHARMACIE

Les insectes : une nouvelle ressource en protéines pour
l'alimentation humaine

T H E S E

Présentée et soutenue publiquement

Le 15 Octobre 2013

pour obtenir

le Diplôme d'Etat de Docteur en Pharmacie

par **Marie LVALETTE**

née le 27 septembre 1985 à Metz (57)

Membres du Jury

Président : Jean-Claude BLOCK

Professeur

Juges : Guillaume BARTOIS

Pharmacien d'officine

Jacques FLEURENTIN

Pharmacien d'officine, Président de la Société
Française d'Ethnopharmacologie

Laurent GODÉ

Entomologiste, responsable de la Mission
Biodiversité du Parc naturel régional de Lorraine

**UNIVERSITÉ DE LORRAINE
FACULTÉ DE PHARMACIE
Année universitaire 2013-2014**

DOYEN

Francine PAULUS

Vice-Doyen

Francine KEDZIEREWICZ

Directeur des Etudes

Virginie PICHON

Président du Conseil de la Pédagogie

Bertrand RIHN

Président de la Commission de la Recherche

Christophe GANTZER

Président de la Commission Prospective Facultaire

Jean-Yves JOUZEAU

Responsable de la Cellule de Formations Continue et Individuelle

Béatrice FAIVRE

Responsable ERASMUS :

Francine KEDZIEREWICZ

Responsable de la filière Officine :

Francine PAULUS

Responsables de la filière Industrie :

Isabelle LARTAUD,

Jean-Bernard REGNOUF de VAINS

Responsable du Collège d'Enseignement

Pharmaceutique Hospitalier :

Jean-Michel SIMON

Responsable Pharma Plus E.N.S.I.C. :

Jean-Bernard REGNOUF de VAINS

Responsable Pharma Plus E.N.S.A.I.A. :

Raphaël DUVAL

DOYENS HONORAIRES

Chantal FINANCE

Claude VIGNERON

PROFESSEURS EMERITES

Jeffrey ATKINSON

Max HENRY

Gérard SIEST

Claude VIGNERON

PROFESSEURS HONORAIRES

Roger BONALY

Pierre DIXNEUF

Marie-Madeleine GALTEAU

Thérèse GIRARD

Maurice HOFFMANN

Michel JACQUE

Lucien LALLOZ

Pierre LECTARD

Vincent LOPPINET

Marcel MIRJOLET

Maurice PIERFITTE

Janine SCHWARTZBROD

Louis SCHWARTZBROD

MAITRES DE CONFERENCES HONORAIRES

Monique ALBERT

Gérald CATAU

Jean-Claude CHEVIN

Jocelyne COLLOMB

Bernard DANGIEN

Marie-Claude FUZELLIER

Françoise HINZELIN

Marie-Hélène LIVERTOUX

Bernard MIGNOT

Jean-Louis MONAL

Blandine MOREAU

Dominique NOTTER

Christine PERDICAKIS

Marie-France POCHON

Anne ROVEL

Maria WELLMAN-ROUSSEAU

ASSISTANTS HONORAIRES

Marie-Catherine BERTHE

Annie PAVIS

ENSEIGNANTS

Section
CNU*

Discipline d'enseignement

PROFESSEURS DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS

Danièle BENSOUSSAN-LEJZEROWICZ	82	Thérapie cellulaire
Chantal FINANCE	82	Virologie, Immunologie
Jean-Yves JOUZEAU	80	Bioanalyse du médicament
Jean-Louis MERLIN	82	Biologie cellulaire
Alain NICOLAS	80	Chimie analytique et Bromatologie
Jean-Michel SIMON	81	Economie de la santé, Législation pharmaceutique

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

Jean-Claude BLOCK	87	Santé publique
Christine CAPDEVILLE-ATKINSON	86	Pharmacologie
Raphaël DUVAL	87	Microbiologie clinique
Béatrice FAIVRE	87	Biologie cellulaire, Hématologie
Luc FERRARI ✕	86	Toxicologie
Pascale FRIANT-MICHEL	85	Mathématiques, Physique
Christophe GANTZER	87	Microbiologie
Frédéric JORAND ✕	87	Environnement et Santé
Pierre LABRUDE (retraite 01-11-13)	86	Physiologie, Orthopédie, Maintien à domicile
Isabelle LARTAUD	86	Pharmacologie
Dominique LAURAIN-MATTAR	86	Pharmacognosie
Brigitte LEININGER-MULLER	87	Biochimie
Pierre LEROY	85	Chimie physique
Philippe MAINCENT	85	Pharmacie galénique
Alain MARSURA	32	Chimie organique
Patrick MENU	86	Physiologie
Jean-Bernard REGNOUF de VAINS	86	Chimie thérapeutique
Bertrand RIHN	87	Biochimie, Biologie moléculaire

MAITRES DE CONFÉRENCES - PRATICIENS HOSPITALIERS

Béatrice DEMORE	81	Pharmacie clinique
Julien PERRIN	82	Hématologie biologique
Marie SOCHA	81	Pharmacie clinique, thérapeutique et biotechnique
Nathalie THILLY	81	Santé publique

MAITRES DE CONFÉRENCES

Sandrine BANAS	87	Parasitologie
Mariette BEAUD	87	Biologie cellulaire
Emmanuelle BENOIT	86	Communication et Santé
Isabelle BERTRAND	87	Microbiologie
Michel BOISBRUN	86	Chimie thérapeutique
François BONNEAUX	86	Chimie thérapeutique
Ariane BOUDIER	85	Chimie Physique
Cédric BOURA	86	Physiologie
Igor CLAROT	85	Chimie analytique
Joël COULON	87	Biochimie
Sébastien DADE	85	Bio-informatique
Dominique DECOLIN	85	Chimie analytique
Roudayna DIAB	85	Pharmacie galénique
Natacha DREUMONT	87	Biochimie générale, Biochimie clinique
Joël DUCOURNEAU	85	Biophysique, Acoustique

ENSEIGNANTS (suite)	Section CNU*	Discipline d'enseignement
Florence DUMARCAY	86	Chimie thérapeutique
François DUPUIS	86	Pharmacologie
Adil FAIZ	85	Biophysique, Acoustique
Caroline GAUCHER	85/86	Chimie physique, Pharmacologie
Stéphane GIBAUD	86	Pharmacie clinique
Thierry HUMBERT	86	Chimie organique
Olivier JOUBERT	86	Toxicologie
Francine KEDZIEREWICZ	85	Pharmacie galénique
Alexandrine LAMBERT	85	Informatique, Biostatistiques
Faten MERHI-SOUSSI	87	Hématologie
Christophe MERLIN	87	Microbiologie
Maxime MOURER	86	Chimie organique
Coumba NDIAYE	86	Epidémiologie et Santé publique
Francine PAULUS	85	Informatique
Christine PERDICAKIS	86	Chimie organique
Caroline PERRIN-SARRADO	86	Pharmacologie
Virginie PICHON	85	Biophysique
Anne SAPIN-MINET	85	Pharmacie galénique
Marie-Paule SAUDER	87	Mycologie, Botanique
Gabriel TROCKLE	86	Pharmacologie
Mihayl VARBANOV	87	Immuno-Virologie
Marie-Noëlle VAULTIER	87	Mycologie, Botanique
Emilie VELOT	86	Physiologie-Physiopathologie humaines
Mohamed ZAIOU	87	Biochimie et Biologie moléculaire
Colette ZINUTTI	85	Pharmacie galénique

PROFESSEUR ASSOCIE

Anne MAHEUT-BOSSER	86	Sémiologie
--------------------	----	------------

PROFESSEUR AGREGÉ

Christophe COCHAUD	11	Anglais
--------------------	----	---------

✎ En attente de nomination

***Disciplines du Conseil National des Universités :**

80 : Personnels enseignants et hospitaliers de pharmacie en sciences physico-chimiques et ingénierie appliquée à la santé

81 : Personnels enseignants et hospitaliers de pharmacie en sciences du médicament et des autres produits de santé

82 : Personnels enseignants et hospitaliers de pharmacie en sciences biologiques, fondamentales et cliniques

85 ; Personnels enseignants-chercheurs de pharmacie en sciences physico-chimiques et ingénierie appliquée à la santé

86 : Personnels enseignants-chercheurs de pharmacie en sciences du médicament et des autres produits de santé

87 : Personnels enseignants-chercheurs de pharmacie en sciences biologiques, fondamentales et cliniques

32 : Personnel enseignant-chercheur de sciences en chimie organique, minérale, industrielle

11 : Professeur agrégé de lettres et sciences humaines en langues et littératures anglaises et anglo-saxonnes

SERMENT DES APOTHICAIRES



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

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

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

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine ; en aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque.



« LA FACULTE N'ENTEND DONNER AUCUNE
APPROBATION, NI IMPROBATION AUX OPINIONS
EMISES DANS LES THESES, CES OPINIONS DOIVENT
ETRE CONSIDEREES COMME PROPRES A LEUR
AUTEUR ».

REMERCIEMENTS

À mon président et directeur de thèse,

Monsieur Jean-Claude BLOCK

Professeur des universités

Pour avoir accepté la direction et la présidence de cette thèse.

Pour votre disponibilité, votre patience et vos précieux conseils.

Veillez trouver l'expression de ma reconnaissance et de mes sincères remerciements.

À mes juges,

Monsieur Guillaume BARTOIS

Pharmacien d'officine à Écrouves (54).

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Soyez assuré de ma gratitude et de mes sincères remerciements.

Monsieur Jacques FLEURENTIN

Pharmacien d'officine à Woippy (57), Président de la Société Française d'Ethnopharmacologie .

Pour m'avoir fait l'honneur de juger ce travail en votre qualité d'ethno-pharmacologue.

Veillez trouver l'expression de mon respect et de ma reconnaissance.

Monsieur Laurent GODÉ

Entomologiste, responsable de la Mission Biodiversité du Parc naturel régional de Lorraine.

Pour l'intérêt porté à ce travail.

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de le juger.

Soyez assuré de mon respect et de mes sincères remerciements.

À Ilan,

Pour m'avoir soutenu et supporté dans les bons comme les mauvais moments.

Pour tout le bonheur que tu m'apportes.

Pour tous nos projets à venir.

À mes parents et mes frères,

Pour avoir toujours cru en ma réussite et pour m'avoir soutenu depuis le premier jour.

Pour avoir su trouver les mots pour me motiver quand le cœur n'y était plus.

Pour toute la joie que vous m'apportez.

À ma famille,

Mes grands-parents, mes tantes, oncles et cousines, pour le plaisir que nous avons d'être ensemble. À mon Papou, qui aurait aimé être là pour ce jour particulier.

À ma belle-famille,

Pour m'avoir fait une place parmi vous.

Pour les bons moments passés et à venir.

À mes amis,

Peter et Yannick, pour la saine compétition entre nous pour celui qui passerait sa thèse en premier.

Mes copines Marie et Julie, pour leur soutien indéfectible et nos après-midi à papoter.

À Guillaume, Bat, Fnox et Zabouche, Max, Marjolaine et Ben, pour toutes ces bonnes soirées, j'espère qu'il y en aura d'autres bientôt.

À tous ceux que j'oublie.

À Mme DIONISIUS et toute l'équipe de la Pharmacie Saint Fiacre,

Pour m'avoir accueilli dans votre équipe.

Pour la bonne humeur qui rythme nos journées.

SOMMAIRE

Introduction	1
1) Première partie : la malnutrition protéino-énergétique mondiale: situation actuelle et évolution future.	4
1.1) Besoins nutritionnels par classe d'individus.....	4
1.1.1) Besoins nutritionnels du nourrisson.....	5
1.1.2) Besoins nutritionnels de l'enfant et de l'adolescent.....	6
1.1.3) Besoins nutritionnels de l'homme et la femme adultes.....	6
1.1.4) Besoins de la personne âgée.	7
1.2) Causes et conséquences des carences énergétiques et protéiques.....	7
1.2.1) La malnutrition protéino-énergétique chez l'enfant.	8
1.2.1.1) Le Kwashiorkor.....	9
1.2.1.2) Le marasme nutritionnel.	10
1.2.1.3) Le kwashiorkor marastique.	11
1.2.2.) Dépistage de la malnutrition.....	11
1.2.3) Traitement de la malnutrition protéino-énergétique.....	13
1.2.4) Malnutritions protéino-énergétiques de l'adulte.	16
1.2.4.1) Kwashiorkor chez l'adulte.	16
1.2.4.2) Marasme chez l'adulte	16
1.3) Cartographie mondiale de la faim.....	17
1.3.1) Etat des lieux en 2012	17
1.3.2) Facteurs influant la cartographie de la faim.	21
1.3.2.1) Facteurs climatiques.	21
1.3.2.3) Facteurs humains.	22
1.4) Evolution de la démographie mondiale dans les décennies à venir.....	22
2) Deuxième partie : l'insecte	25
2.1) L'insecte.....	25
2.1.1) La place des insectes dans le règne animal.....	25
2.1.2) Les stades d'évolution de l'insecte.....	26
2.2) Répartition mondiale des insectes comestibles et des régions pratiquant l'entomophagie.	28
2.3) Quels ordres d'insectes sont les plus consommés ? À quels stades ?.....	31
2.3.1) L'ordre des Coléoptères.....	32
2.3.2) L'ordre des Hyménoptères.....	35
2.3.3) L'ordre des Orthoptères.....	38
2.3.4) L'ordre des Lépidoptères.....	39
2.3.5) L'ordre des Isoptères.....	40
2.3.6) L'ordre des Diptères.....	40
2.3.7) L'ordre des Odonatoptères.....	41
2.4) Valeurs nutritionnelles des insectes.....	41
2.4.1) Les valeurs énergétiques et protéiques.....	41
2.4.2) Comparaison des apports protéiques et énergétiques des principaux animaux d'élevage et des insectes.....	45
3) Troisième partie : l'élevage d'insectes	48
3.1) Récolter des insectes en milieu naturel.....	48
3.1.1) Les différents moyens de capture.....	48
3.1.2) Avantages et inconvénients d'une récolte en milieu sauvage.....	52
3.2) L'élevage d'insectes	53
3.2.1) Définition d'un mini-élevage.....	53
3.2.2) Les différents degrés d'élevage d'insectes.....	54
3.2.3) Exemples d'élevages d'insectes.....	56

3.2.3.1) Elevage de vers de farine (larves de <i>Tenebrio molitor</i>).	57
3.2.3.2) Elevage de grillons <i>Acheta domesticus</i>	58
3.2.3.3) Elevage d'asticots de <i>Musca domestica</i>	59
3.4) Comparaison entre un élevage traditionnel et un élevage d'insecte.	60
3.5) Accommoder et conserver les insectes.	63
Conclusion	64
Références bibliographiques	66
Annexes	70
RESUME :	75

Liste des abréviations

AD : Approximate Digestibility

ANAES : Agence Nationale d'Accréditation et d'Evaluation en Santé

ANC : Apports Nutritionnels Conseillés

ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement, et du Travail

B : Belgique

CH₄ : Méthane

CO₂ : Dioxyde de carbone

ECD : Efficacité de Conversion des aliments Digérés

ECI : Efficacité de Conversion de la nourriture Ingérée

EPPO : European and Mediterranean Plant Protection Organization

FAO : Food and Agriculture Organization (of the United Nations)

IMC : Indice de Masse Corporelle

INED : Institut National d'Etudes Démographiques

Kcal : Kilocalorie

MPE : Malnutrition Protéino-Energétique

NH₃ : Ammoniac

NL : Nederland

NO₂ : Dioxyde d'azote

NRI : Nutrition Risk Index

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONU : Organisation des Nations Unies

OPIE : Office Pour les Insectes et leur Environnement

UNAM : Université Nationale Autonome du Mexique

UNICEF : United Nation International Children's Emergency Fund

USA : United States of America

UV : Ultraviolet

VIH : Virus de l'Immunodéficience Humaine

Liste des figures.

Figure 1: Les caractéristiques du Kwashiorkor (Latham, 2001).	10
Figure 2 : Nombre de mal-nourris dans le monde entre 1990 et 2010 (Nations Unies, 2011).	18
Figure 3 : Progrès constatés au niveau mondial pour atteindre l'objectif de réduction de l'extrême pauvreté et de la faim (FAO, 2010).	18
Figure 4 : Sous-alimentation dans le monde par région (en millions) (United Nations World Food, 2010).	19
Figure 5 : Carte de la faim dans le monde en 2011 (Programme alimentaire mondial, 2011).	20
Figure 6 : Evolution de la population mondiale depuis 1800 et projections jusqu'en 2100 (Pison, 2011)	22
Figure 7 : Estimations et projections de la population mondiale par régions, selon les scénarios moyens, entre 1950 et 2100 (Nations Unies, 2011).	23
Figure 8 : Représentation du cycle de développement d'un insecte hétérométabole (codexvirtualis.fr, 2013).	27
Figure 9 : Représentation du cycle de développement d'un insecte holométabole (codexvirtualis.fr, 2013).	28
Figure 10: Nombre d'espèces d'insectes comestibles répertoriés à travers le monde par grandes régions. (http://www.fao.org/forestry/edibleinsects/65425/en/ , 2012).	29
Figure 11 : Pourcentage d'espèces comestibles par ordre (Johnson, 2010).	32
Figure 12 : Larve de <i>Tenebrio molitor</i> (Bellmann, 2006).	33
Figure 13 : Charançon rouge du palmier (Fraval, 2007).	33
Figure 14 : Larve de <i>Rhyncophorus ferrugineus</i> vue de dessous (photo de gauche) et de dessus (photo de droite) (EPPO, 2007).	34
Figure 15 : Scarabée adulte (Central Plantation Crops Research Institute India, http://www.issg.org/database/image.asp?ii=383&ic=e).	34
Figure 16 : Larve d' <i>Oryctes Rhinoceros</i> (Central Plantation Crops Research Institute India, http://www.issg.org/database/image.asp?ii=381&ic=e).	35
Figure 17 : Récolte de couvains d' <i>A. dorsata</i> (Adalla et Cervancia, 2010).	36
Figure 18 : <i>Vespula vulgaris</i> (Bellmann, 2006).	36
Figure 19: Larves de <i>Vespula vulgaris</i> (Bellmann, 2006).	36
Figure 20 : Fourmi à miel (Louey Yen, 2010).	37
Figure 21 : Panier de kroto avant le tri (Césard, 2004).	37
Figure 22 : Œufs de fourmi <i>Liometopum</i> formant l'escamole (Ramos-Elorduy, 2009).	38
Figure 23 : <i>Acheta domesticus</i> (Leraut, 2003).	38
Figure 24: <i>Locusta migratoria</i> (Adalla et Cervancia, 2010).	39
Figure 25: Chenilles <i>Imbrasia oyemensis</i> se nourrissant de feuilles de Sapelli, leur arbre hôte (N'Gasse, 2003).	39
Figure 26: Pupa de <i>Samia riciini</i> (Sirimungkararat et al., 2010).	40
Figure 27 : Termite sexuée ailée <i>Reticulitermes lucifugus</i> (Bellmann, 2006).	40
Figure 28 : Larve de <i>Musca domestica</i> (Bellmann, 2006).	41
Figure 29 : Larve de <i>Sympetrum meridional</i> et <i>Lestes Macrostigma</i> (Jourde, 2010).	41
Figure 30 : Guêpe <i>Vespula flaviceps</i> transportant un appât (Nonaka, 2010).	49
Figure 31 : Criquet taupe <i>Gryllotalpa longipennis</i> (Adalla et Cervancia, 2010).	50
Figure 32: Colonie d' <i>Imbrasia ertli</i> dans le tronc de <i>Funtumia</i> sp. (N'Gasse, 2003).	50
Figure 33: Libellule prisonnière d'un piège à glu (Césard, 2006).	51
Figure 34 : Brochette de libellules (Césard, 2006).	51
Figure 35 : Un abri contenant un nid de <i>Vespula</i> spp (Nonaka, 2010).	54
Figure 36: <i>Antheraea pernyi</i> adulte et au stade de chenille (OPIE, 2013).	55
Figure 37 : Vivarium à <i>Tenebrio molitor</i> (OPIE, 2013).	57
Figure 38 : Vivarium à grillons (OPIE, 2013).	58
Figure 39 : Espace nécessaire pour produire 1 kg de protéines consommables par l'Homme (Ooninx et de Boer, 2012).	60
Figure 40 : Un plat d'Adobong camaru ((Adalla et Cervancia, 2010).	63

Liste des tableaux.

Tableau 1: Classification des apports nutritionnels conseillés (ANC) en énergie et en protéines en fonction de l'âge (Vasson et Jardel, 2005).	4
Tableau 2: Index de dénutrition chez l'enfant d'après Waterlow <i>et al.</i> (Jacotot et Campillo, 2003).	9
Tableau 3 : Classification des dénitritions en fonction de l'IMC (Jacotot et Campillo, 2003).	11
Tableau 4 : Classification des taux d'albumine sérique (Lesourd <i>et al.</i> , 2001).	12
Tableau 5 : Classification des taux de pré-albumine (Janssens, 2009).	12
Tableau 6 : Classification des valeurs de l'index de risque nutritionnel (Vasson et Jardel, 2005).	13
Tableau 7 : Comparaison de la composition de la solution de réhydratation ReSoMal (Solution spéciale de réhydratation pour la malnutrition) et de la solution standard de l'OMS/UNICEF (Briend, 1998 ; Ashworth <i>et al.</i> , 2004; OMS, 2000).	14
Tableau 8 : Composition de la préparation F75 (Briend, 1998).	15
Tableau 9 : Protocole OMS pour la renutrition chez l'enfant lors de la phase de stabilisation (Ashworth, 2004).	15
Tableau 10 : Composition de la préparation F100 (Briend, 1998).	16
Tableau 11 : Valeurs énergétiques et protéiques des principaux ordres d'insectes.	43

Introduction

La famine et la malnutrition sont des fléaux qui perdurent encore au 21^{ème} siècle. Cette situation touche certains pays plus que d'autres : quelques zones en Amérique du Sud (Bolivie, Paraguay, Pérou), en Asie (Mongolie, Pakistan), mais majoritairement en Afrique (Programme alimentaire mondial, 2011). C'est en Afrique centrale (Ethiopie, Mozambique, Tchad, ...) que subsistent les plus forts taux de malnutrition et de dénutrition au monde.

La malnutrition correspond à un état nutritionnel qui s'écarte de la norme définie par les physiologistes et qui est la conséquence d'une alimentation mal équilibrée en quantité et/ou en qualité. La malnutrition regroupe la sous-alimentation, la suralimentation, la mauvaise assimilation, mais c'est avant tout dans le sens de la sous-alimentation que nous aborderons cette thématique (Larousse, 2012).

La malnutrition résulte généralement d'une combinaison de plusieurs facteurs et en particulier d'un manque de ressources disponibles associé à un organisme déjà affaibli ce qui provoque diverses carences, qu'elles soient énergétiques, protéiques ou vitaminiques.

Les prévisions démographiques pour les 100 ans à venir montrent que cette situation ne va pas s'améliorer (7 milliards de personnes aujourd'hui peuplent la planète et 10 milliards d'habitants sont prévisibles d'ici à 2100) (Nations Unies, 2011). En effet, si la plupart des pays atteindront de fait une certaine stabilité démographique, d'autres auront une population en fort accroissement (notamment le Nigeria et le Mali en Afrique (Tabutin et Schoumaker, 2004) et l'Inde en Asie (Nations Unies, 2011).

Dans le même temps, les ressources telles que certaines cultures et l'eau douce se feront plus rares, à la fois du fait de l'accroissement de la demande mais aussi des facteurs climatiques. Les zones les plus touchées par toutes ces modifications seront sans doute l'Asie et l'Afrique (Field *et al.*, 2012). La malnutrition demeure l'un des principaux sujets de préoccupation des instances mondiales. L'ONU en a d'ailleurs fait une priorité absolue (objectif 1 sur les 8 objectifs de développement du millénaire) (Nations Unies, 2011).

Pour améliorer les apports en protéines et en énergie des pays en développement, la solution ne viendra pas de l'élevage classique (on entend ici par classique l'élevage des animaux habituellement produits par l'Homme pour obtenir de la viande, du lait ou des œufs, ce qui regroupe les élevages bovins, ovins, caprins, porcins et la pisciculture), trop coûteux en eau, en place et fort producteur d'émissions polluantes. De plus, la place utilisée pour cultiver la

nourriture de ces animaux pourrait servir à produire de quoi nourrir les populations directement. Il faut donc se tourner vers des solutions alternatives : la récolte et l'élevage d'insectes représentent l'une de ces solutions.

Les insectes représentent une ressource encore mal connue qui est de plus en plus envisagée comme source de nourriture et de protéines. Certaines entreprises (Micronutris en France, Yunnan Insect Biotechnologies en Chine) commercialisent des insectes et certaines universités (Université de Wageningen, NL ; Université de Liège Agro-Bio Tech, B ; Université du Wisconsin, USA) ont des pôles de recherche entièrement tournés vers l'entomophagie (*i.e.* l'étude de la consommation d'insectes en tant que nourriture destinée à l'être humain). Le Muséum d'Histoire Naturelle de Paris présente actuellement une exposition intitulée « Les insectes passent à table ». Une première partie montre les types d'insectes, classés par types de pièces buccales, puis la seconde salle expose divers insectes dont la consommation est régulière à travers le monde ainsi qu'une comparaison succincte des apports protéiques des insectes avec les espèces d'élevage traditionnel.

Les insectes comptent actuellement environ 1 million d'espèces décrites à ce jour, et sont déjà consommés de manière plus ou moins régulière dans plus de 110 pays (Jongema cité par Rumpold et Schlüter, 2012). Ils sont majoritairement récoltés ou ramassés dans la nature mais des élevages de plus ou moins grande importance existent. L'élevage se pratique à partir d'espèces propres à chaque pays et ne consomme que les déchets provenant de la consommation humaine, ou des résidus collectés dans des cultures. Ils sont également économes en eau, en nourriture, en place requise et polluent beaucoup moins que les élevages traditionnels. L'élevage d'insecte est pour le moment majoritairement pratiqué pour nourrir les animaux, pour des travaux de recherche scientifique, en médecine ou à des fins de collection.

Nous avons exploré ce thème sous trois angles et subdivisé ce mémoire en trois parties.

- La première partie rappelle les besoins énergétiques et protéiques de l'être humain aux différents stades de la vie, puis établit les conséquences d'une carence en protéines et / ou en énergie et les traitements possibles. Elle permet également de faire le point sur la situation démographique et nutritionnelle mondiale, et de voir comment cette situation pourrait évoluer dans les années à venir.

- La seconde partie étudie l'insecte comestible, sa répartition mondiale, les ordres et espèces les plus consommées. Un comparatif entre les différents ordres et stades d'insectes est établi selon leurs teneurs énergétique et protéique. Enfin cette partie a pour but de comparer les valeurs nutritionnelles des animaux consommés habituellement à celles des insectes.

- La troisième partie s'intéresse aux moyens d'élever des insectes, aux critères qu'un insecte doit respecter pour être un bon candidat à l'élevage, ainsi qu'une comparaison de l'élevage classique et de l'élevage d'insectes sur des points tels que la place requise, la consommation d'eau ou la quantité de pollution rejetée.

1) Première partie : la malnutrition protéino-énergétique mondiale: situation actuelle et évolution future.

Cette première partie établit tout d'abord un rappel sur les besoins nutritionnels des différentes classes d'individus et durant les situations particulières de la vie telles que la grossesse ou l'allaitement. Elle recense ensuite les diverses formes de malnutrition protéino-énergétiques avec leurs causes, leurs symptômes, les conséquences sur l'organisme et les traitements à appliquer.

J'ai ensuite essayé d'établir une cartographie mondiale de la faim en 2012 ainsi que des différents facteurs pouvant faire évoluer cette cartographie afin de déterminer quels pays sont dans une situation précaire. Enfin, une étude des prévisions démographiques mondiales d'ici à 2100 permet de mettre en évidence les zones qui deviendront des pôles démographiques majeurs. Ces zones devront être surveillées car à risque de précarité nutritionnelle.

1.1) Besoins nutritionnels par classe d'individus

Les besoins nutritionnels d'un individu varient selon le sexe, la période de la vie et lors de situations particulières telles que la grossesse ou l'allaitement. Le tableau 1 récapitule ces différents besoins.

Tableau 1: Classification des apports nutritionnels conseillés (ANC) en énergie et en protéines en fonction de l'âge (Vasson et Jardel, 2005).

Individu		Age	Energie (kcal/kg/j)	Protéines (g/kg/j)
Nourrisson			100 à 120	1,0
Enfant 3 à 10 ans		3 à 6 ans	90 ^d	0,9
		7 à 10 ans	80 ^d	
Enfant 11 à 14 ans		Garçon	60 ^d	0,9
		Fille	50 ^d	0,9
Adolescent	Garçon	≥15 ans	50 ^d	0,9
	Fille	≥15 ans	40 ^d	0,8
Adulte	Homme ⁱ	20-40 ans	2700 kcal/j	0,8
		41-60 ans	2500 kcal/j	

	Femme²	20-40 ans 41-60 ans	2200 kcal/j 2000 kcal/j	0,8
Femme enceinte		1 ^{er} trimestre 2 ^{ème} trimestre 3 ^{ème} trimestre	ANC + 150 kcal/j ANC + 200 à 250 kcal/j ANC+ 200 à 250 kcal/j	ANC+ 1,3 g/j ANC+6,1 g/j ANC+10,7 g/j
Femme allaitante			ANC+ 500 kcal/j maximum	+ 17 à 20g ³
Personne âgée		Homme ≥ 65 ans Femme ≥ 65 ans	≥ 2000 ≥1800 (36 g/kg) ⁵	1,2

¹Homme de 70kg pratiquant les activités habituelles de la majorité de la population.

²Femme de 60kg pratiquant les activités habituelles de la majorité de la population.

³Apfelbaum *et al.*, 1995.

⁴Jacotot et Campillo., 2003.

⁵Schlienger, 2011.

1.1.1) Besoins nutritionnels du nourrisson.

Un enfant est appelé nourrisson de la naissance jusqu'à 30 mois. Les besoins nutritionnels du nourrisson regroupent les besoins de maintenance (dépenses dues au métabolisme basal, à la thermorégulation, à la transformation des nutriments et à l'activité physique) et les besoins de croissance. En effet, c'est durant les deux premières années de la vie que la croissance est la plus rapide (Jacotot et Campillo, 2003). Chez le nourrisson les besoins énergétiques ne sont pas fonction de l'âge ou de la taille mais du poids.

Les besoins sont couverts dans un premier temps par le lait maternel, de préférence, qui apparaît idéal sur le plan nutritionnel. Comme le montre le tableau 1, le nourrisson a besoin de 100 à 120 kcal/kg/j et de 1 g/kg/j de protéines et l'allaitement couvre entièrement ces besoins. Le lait maternel et le lait pour nourrisson (lait en poudre industriel dont les propriétés se rapprochent du lait maternel afin de pouvoir se substituer à celui-ci) (jusque 6 mois) sont quasi-équivalents en terme d'apport énergétique (60-70 kcal/100 mL pour le lait maternel et 60-75 kcal/100 mL pour le lait nourrisson) (Vasson et Jardel, 2005) mais la préparation industrielle pour nourrisson contient plus de protéines (1,4-1,9 g/100 mL contre 0,8-1,2 g/100 mL pour le lait maternel).

À partir de 6 mois, il est nécessaire de diversifier peu à peu l'alimentation.

1.1.2) Besoins nutritionnels de l'enfant et de l'adolescent.

Chez les adolescents, les besoins de maintenance sont supérieurs de 5 à 10 % chez les garçons par rapport à ceux des filles (du fait d'une masse musculaire en moyenne plus importante) (Apfelbaum *et al.*, 1995).

1.1.3) Besoins nutritionnels de l'homme et la femme adultes.

Le tableau 1 montre qu'un homme ayant entre 20 et 40 ans pratiquant les activités habituelles de la majorité de la population a besoin de 2700 kcal par jour (Vasson et Jardel, 2005). Une femme de 60 kg pratiquant les activités habituelles de la majorité de la population a besoin de 2200 Kcal journaliers (Vasson et Jardel, 2005).

Lors d'une grossesse, les besoins nutritionnels ne varient pas beaucoup : durant le premier trimestre, il y a peu de variation des besoins énergétiques, le besoin supplémentaire n'étant que de 150 kcal/j. Puis au second et au troisième trimestre, le coût énergétique augmente pour passer à 250-300 kcal /j supplémentaires (le fœtus a besoin de 80 kcal/j pour se développer). Ces besoins complémentaires correspondent à une maturation et au développement du fœtus et du placenta, ainsi qu'à l'accroissement des masses maternelles liées à la grossesse (utérus, seins). Ces besoins sont en général couverts par l'alimentation dans les pays industrialisés. De même pour l'apport protéique, celui-ci doit être peu augmenté au premier trimestre (1,3 g/jour en sus des apports normaux) mais doit être plus important au second (+6,1 g/jour et surtout au troisième trimestre (+10,7 g/jour). Cependant, en général, dans les pays industrialisés, les apports habituels sont supérieurs aux besoins et aucune augmentation de la ration n'est à prévoir.

Lorsqu'une femme allaite, tous les nutriments contenus dans le lait proviennent de ses propres réserves et de son alimentation. Aussi, elle a besoin de 500 kcal/j supplémentaires et d'un apport protéique d'environ 10 g supplémentaires par jour (en reconnaissant que le lait maternel contient 1,2 g/100mL de protéines et que le volume produit est approximativement de 850 mL par jour). Comme dans le cas d'une grossesse, si l'alimentation est riche et diversifiée, ce supplément de protéines est sans doute déjà couvert.

1.1.4) Besoins de la personne âgée.

La personne âgée a les mêmes besoins énergétiques qu'un individu adulte et ils sont répartis de la même manière (60 % consacrés au métabolisme de base, 10 % à la thermorégulation et les 30 % restants aux diverses activités). Ce qui varie en revanche est le besoin protéique, celui-ci est en effet plus important : environ 1,2 g/kg/jour contre 0,8 g/kg/jour pour un adulte. Le vieillissement physiologique entraîne une augmentation de la masse grasse et une diminution de la masse maigre (plus importante chez l'homme que chez la femme). Cette perte de masse maigre (musculaire) est appelée sarcopénie. Elle provoque également une baisse de la qualité du muscle (atteinte essentiellement des fibres de type II à contraction rapide). Aussi, il est nécessaire d'augmenter les apports protéiques pour maintenir la masse musculaire (Jacotot et Campillo, 2003 ; Vasson et Jardel, 2005).

1.2) Causes et conséquences des carences énergétiques et protéiques.

La malnutrition correspond à un état nutritionnel qui s'écarte de la norme définie par les physiologistes et qui est la conséquence d'une alimentation mal équilibrée en quantité et/ou en qualité. La malnutrition protéino-énergétique résulte d'un déséquilibre entre les apports en énergie et en protéines fournis par l'alimentation et les besoins de l'organisme. Le terme dénutrition peut également être employé.

Lorsque l'organisme souffre de malnutrition, il puise dans les seules réserves énergétiques, c'est-à-dire dans les réserves graisseuses et musculaires pour maintenir les fonctions essentielles. C'est le rôle de la néoglucogenèse : terme regroupant les différentes voies d'obtention du glucose à partir de substrats différents du glycogène :

- Synthèse de glucose à partir de glycérol obtenu par lipolyse des tissus, qui représente la voie physiologique (Koolman et Röhm, 2010).

- Synthèse de glucose à partir d'acides aminés glucoformateurs obtenus par hydrolyse des protéines musculaires, qui entraîne une fonte musculaire (Koolman et Röhm, 2010).

La malnutrition protéino-énergétique se rencontre majoritairement dans les pays en développement mais concerne également les pays dits développés. Ainsi, en Europe, la prévalence de la dénutrition est estimée entre 5 et 10 % (Ministère de la Santé et des Sports, 2010). Elle touche des malades souffrant de pathologies aiguës ou chroniques et des personnes en situation précaire. La malnutrition protéino-énergétique comprend la dénutrition protéique, la dénutrition énergétique, ou la dénutrition mixte dont découlent trois formes cliniques sévères principales qui sont le Kwashiorkor, le Marasme nutritionnel et le

Kwashiorkor marastique. Ces pathologies touchent généralement l'enfant, bien que les adultes puissent également présenter certains symptômes.

1.2.1) La malnutrition protéino-énergétique chez l'enfant.

La malnutrition protéino-énergétique touche majoritairement l'enfant et se développe surtout lorsque le sevrage maternel n'est pas bien réalisé. En effet, le lait maternel fournit des apports protéiques et énergétiques adéquats jusqu'au 6^{ème} mois, puis la lactation diminue et ne va plus être suffisante à elle seule pour assurer les besoins de l'enfant. Celui-ci peut donc développer une malnutrition protéino-énergétique légère si :

- Le sevrage total se fait trop tôt et l'apport protéique et énergétique de substitution sont insuffisants.
- L'allaitement seul est maintenu après le 6^{ème} mois mais la lactation devient insuffisante pour les besoins de l'enfant qui grandit (il est normalement nécessaire d'associer d'autres aliments au régime alimentaire).
- Le sevrage est bien réalisé mais la nourriture fournie est de mauvaise qualité nutritionnelle ou en quantité insuffisante.

Selon la Classification Internationale des maladies, une malnutrition protéino-énergétique est :

- légère lorsque la perte de poids aboutit à un poids inférieur d'un écart type ou plus, mais moins de deux, à la valeur moyenne de la population de référence. Lors d'une malnutrition protéino énergétique légère, le seul symptôme notable est l'arrêt de la croissance et une courbe de poids stationnaire (FAO et UNICEF, 1994). Ces formes de malnutrition modérées ne sont décelables que par des mesures anthropométriques (taille, poids, périmètre brachial, épaisseur du pli cutané). L'enfant peut cependant développer une forme sévère lors d'un épisode infectieux.

- modérée lorsque la perte de poids aboutit à un poids inférieur de deux écarts types ou plus, mais moins de trois, à la valeur moyenne de la population de référence (ANAES, 2003).

- grave lorsque la perte de poids est importante (émaciation) aboutissant à un poids inférieur d'au moins trois écarts-types à la valeur moyenne de la population de référence (ANAES, 2003). L'enfant présente alors tous les symptômes caractéristiques de sa pathologie.

La classification de Waterlow classe les dénutritions en fonction des deux critères taille et poids (Tableau 2).

Tableau 2: Index de dénutrition chez l'enfant d'après Waterlow *et al.* (Jacotot et Campillo, 2003).

	Pas de dénutrition	Mineure	Modérée	Sévère
Taille¹ (%)	> 95	90-95	85-90	< 85
Poids² (%)	> 90	80-90	70-80	< 70

¹L'indice Taille (%) compare la taille de l'enfant à la taille de référence pour son âge. Il permet de détecter des retards de croissance (Briend, 1998).

²L'indice Poids (%) compare le poids de l'enfant au poids de référence pour son âge. Il permet de détecter les troubles pondéraux (Briend, 1998).

1.2.1.1) Le Kwashiorkor.

C'est la pédiatre Cicely Williams qui, en 1933 au Ghana, rapporte les premiers cas de malnutrition associée à des œdèmes. Puis en 1935, elle nomme ce tableau clinique « Kwashiorkor », terme ghanéen faisant référence au sevrage brutal de l'enfant (Vasson et Jardel, 2005 ; Briend, 1998). C'est l'une des formes les plus graves de malnutrition protéino-énergétique et la manifestation d'une carence essentiellement protéique. Il apparaît en général chez les enfants entre 1 et 3 ans. Toutefois le Kwashiorkor peut aussi se développer après un épisode infectieux ou y être associé (diarrhée, rougeole, infections respiratoires, parasitoses, infection à VIH) (Dupire, 1998): l'infection provoque une perte d'appétit qui fait basculer l'enfant d'une forme de Kwashiorkor légère à modérée à une forme grave. De plus, l'infection provoque une augmentation des pertes azotées qui ne peuvent être compensées que par un apport protéique alimentaire. Comme le montre la figure 1, un enfant atteint de Kwashiorkor présente un retard de croissance essentiellement pondéral (pouvant être masqué par les œdèmes). Des œdèmes se développent, d'abord dans la partie basse du corps. Cela commence par les pieds qui commencent à enfler, puis les jambes, et éventuellement les mains et le visage). Le malade présente également des troubles digestifs (anorexie, diarrhée chronique avec malabsorption et ballonnement), des manifestations dermatologiques (éruption faite de plaques rouges aux points de pression, altérations de la peau, dermatose écailleuse), une altération des cheveux (troubles de la pigmentation, alopecie partielle, modifications de la texture). Sur le plan interne il y a une anémie quasi-systématique due au manque de protéines nécessaires à la synthèse des globules sanguins. Elle peut être accrue par d'autres carences ou par des pathologies associées.

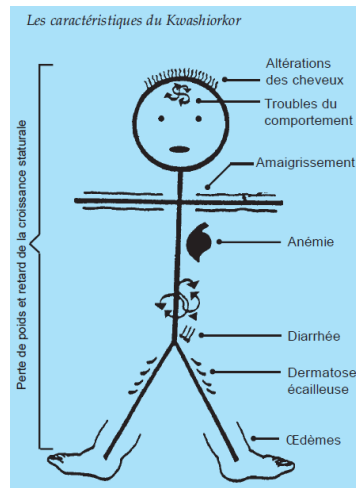


Figure 1: Les caractéristiques du Kwashiorkor (Latham, 2001).

En plus des symptômes présentés dans la figure 1, il faut noter une atteinte limitée des graisses sous-cutanées et une fonte musculaire. Le ventre est gonflé et on constate une hépatomégalie et une stéatose hépatique (Jacotot et Campillo, 2003 ; Vasson et Jardel, 2005). La présence d'une hypo-albuminémie, une hypernatrémie et une hypokaliémie sont souvent signalées. Enfin, il y a des modifications du comportement (tristesse, apathie, refus de nourriture) et une sensibilité accrue aux infections (due à une fragilité immunitaire) (Latham, 2001; Dupire, 1998).

1.2.1.2) Le marasme nutritionnel.

Le marasme est la seconde forme grave de malnutrition protéino-énergétique, il est beaucoup plus répandu que le Kwashiorkor. Il s'agit dans ce cas d'un manque à la fois de protéines et d'énergie (Dupire, 1998). Les causes d'un marasme sont multiples : l'enfant ne reçoit pas assez de lait maternel ou d'un aliment de substitution adapté. Comme pour le Kwashiorkor, un facteur infectieux peut intervenir comme déclencheur de la pathologie.

L'enfant souffre d'un retard de croissance (poids inférieur à 60 % du poids normal pour l'âge) et présente une absence de graisses sous-cutanées avec fonte des muscles. La maigreur est extrême, ce qui lui donne un faciès émacié. Contrairement au Kwashiorkor, il n'y a pas d'œdèmes ni de dermatose. De plus, l'appétit est conservé et l'enfant n'est pas apathique. Il souffre de diarrhée et d'anémie (Latham, 2001; Dupire, 1998).

1.2.1.3) Le kwashiorkor marastique.

C'est l'un des nombreux tableaux cliniques intermédiaires avec un mélange de symptômes entre les deux tableaux cliniques précédents: malnutrition sévère avec des œdèmes et un poids inférieur à 60 % du poids normal pour l'âge (Latham, 2001).

L'enfant présente tous les signes de marasme et, en plus des œdèmes, il peut également développer d'autres symptômes de Kwashiorkor.

1.2.2.) Dépistage de la malnutrition.

Lorsqu'il y a suspicion de malnutrition, la première étape d'un dépistage passe par la prise de mesures anthropométriques : taille, poids, périmètre brachial, épaisseur du pli cutané. A partir de ces données, il est possible de déduire plusieurs indices : Indice de masse corporel, Indice de risque nutritionnel (indice établissant une corrélation entre l'albumine sérique et la perte de poids d'un patient). Il faut également procéder à des dosages d'albuminémie et de transthyrétinémie pour déterminer l'avancement de la dénutrition.

- L'indice de Masse Corporelle (IMC).

L'indice de masse corporelle permet de mesurer la corpulence d'une personne. Il se base sur la taille et le poids d'un individu selon la formule : $\text{Poids (kg)} / \text{Taille}^2 \text{ (m)}$. Une dénutrition est considérée comme sévère lorsque l'indice est inférieur à 18,5, puis la dénutrition suit 5 grades selon l'IMC (Tableau 3).

Tableau 3 : Classification des dénutritions en fonction de l'IMC (Jacotot et Campillo, 2003).

Indice de masse corporelle	Grade de dénutrition
18,4 à 17,0	I
16,9 à 15,0	II
14,9 à 13,0	III
12,9 à 10,0	IV
< 10,0	V

- Dosage de l'albumine sérique.

La mesure de l'albumine sérique permet de donner un aperçu de l'état nutritionnel du patient à moyen terme, du fait de sa demi-vie longue (21 jours). Ce dosage n'est pas très utile quand il s'agit d'établir un tableau clinique rapidement. Le taux d'albumine chute plus dans un cas

de Kwashiorkor que dans le cas du marasme. Comme le montre le tableau 4, l'albuminémie est normale quand elle est supérieure ou égale à 35 g/l. On considère que la concentration de 28 g/l constitue le seuil d'alerte d'évolution vers une malnutrition protéino-énergétique grave. De plus, il est nécessaire d'éliminer les autres étiologies entraînant une diminution de l'albuminémie (état inflammatoire, insuffisance hépatique, syndrome néphrotique, pertes digestives ...) (Janssens, 2009).

Tableau 4 : Classification des taux d'albumine sérique (Lesourd *et al.*, 2001).

Taux (g/l)	Signification
> ou = 35	Normal
30 à 34	Subnormal (dénutrition modérée)
25 à 29	Bas (dénutrition sévère)
< ou = 25	Pathologique

- Dosage de la pré-albumine.

La pré-albumine (aussi appelée transthyrétine) est une protéine synthétisée entre autre par le foie. Elle possède 2 fonctions principales : elle assure le transport de la vitamine A (sous sa forme rétinol) et le transport des hormones thyroïdiennes T3 et T4. Sa demi-vie est très courte (48 h), ce qui en fait un excellent marqueur des états de dénutrition car elle permet le suivi des protocoles de renutrition (Vasson et Jardel, 2005 ; Janssens, 2009). Comme le montre le tableau 5, une dénutrition est avérée quand le taux de pré-albumine sérique descend sous les 0,25 g/l.

Tableau 5 : Classification des taux de pré-albumine (Janssens, 2009).

Taux (g/l)	Signification
0,25 à 0,35	Normal
0,15 à 0,25	Dénutrition modérée
< 0,15	Dénutrition sévère

Comme pour l'albuminémie, il faut éliminer les autres causes de diminution de la pré-albumine avant de conclure à une dénutrition comme l'existence d'un état inflammatoire, ou une pathologie hépatique.

- Mesure de l'index de risque nutritionnel ou Index de Buzby

Cet indice établit une corrélation entre le taux d'albumine sérique et le pourcentage de perte de poids par rapport au poids usuel du patient.

Il se calcule selon la formule:

$$\text{NRI} = 1,519 \times \text{albuminémie (g/l)} + 0,417 \times (\text{poids actuel} / \text{poids usuel}) / 100$$

Tableau 6 : Classification des valeurs de l'index de risque nutritionnel (Vasson et Jardel, 2005).

Valeur du NRI (en pourcentage)	Signification
> 97,5 %	Normal
83,5% - 97,5%	Dénutrition modérée
< 83,5%	Dénutrition sévère

1.2.3) Traitement de la malnutrition protéino-énergétique.

Le traitement de la malnutrition se déroule en deux phases : une phase initiale de stabilisation et une phase de récupération.

La phase initiale sert à traiter les différents troubles dont souffre le patient : correction de la déshydratation, traitement des carences vitaminiques, des maladies infectieuses et autres parasitoses, correction des anémies et traitement et/ou prévention de l'hypothermie et de l'hypoglycémie et réalimentation progressive. La phase initiale dure tant que le malade est anorexique. Dans un cas de Kwashiorkor, cette phase dure environ une semaine, temps nécessaire pour que le patient élimine ses œdèmes et retrouve l'appétit (Briend, 1998). Dans le cas d'un marasme, cette phase dure 2 à 3 jours (Ashworth *et al.*, 2004).

La phase de récupération permet au patient de reprendre rapidement du poids. Le début de cette phase est marqué par un retour de l'appétit.

- Traitement de la déshydratation et des troubles électrolytiques.

La réhydratation ne se fait pas par voie intraveineuse sauf cas exceptionnel (état de choc). Ce sont les voies orale ou nasogastrique qui sont utilisées. La solution standard fournie par l'OMS contient trop de sodium et pas assez de potassium pour l'organisme de la personne mal

nourrie (Tableau 7). C'est donc l'utilisation du ReSoMal, solution spéciale de réhydratation pour la malnutrition produite par le laboratoire Nutriset. (Ashworth *et al.*, 2004; OMS, 2000).

Tableau 7 : Comparaison de la composition de la solution de réhydratation ReSoMal (Solution spéciale de réhydratation pour la malnutrition) et de la solution standard de l'OMS/UNICEF (Briend, 1998 ; Ashworth *et al.*, 2004; OMS, 2000).

Nutriment	ReSoMal (mmol/l)	OMS/UNICEF (mmol/l)
Glucose	125	111
Sodium	45	90
Potassium	40	20
Chlore	70	80
Citrate	7	10
Magnésium	3	-
Zinc	0,3	-
Cuivre	0,045	-
Osmolarité (mOsm/l)	290	311

Lors de la prise en charge d'un enfant malnutri, la réhydratation débute avec 5 mL/kg toutes les 30 minutes pendant 2 heures, par voie orale ou nasogastrique, puis passage à 5-10 mL/kg toutes les heures pour arriver à un total de 70 à 100 mL/kg sur 12 heures. Ce processus de réhydratation est ajusté en fonction de plusieurs facteurs : la quantité bue par le patient, le volume des selles, la présence ou non de vomissements, la survenue d'une hyperhydratation (Ashworth *et al.*, 2004; Briend, 1998 ; OMS, 2000).

Durant ce traitement, le malade est réévalué toutes les 30 minutes pendant 2 heures puis toutes les heures : surveillance des fréquences cardiaque et pulmonaire, relevé de la fréquence de la miction et des selles (Ashworth *et al.*, 2004).

- Réalimentation progressive.

La réalimentation commence avec une solution lactée F75 (75 kcal/100mL et 0,9 g de protéines/100mL) (Ashworth *et al.*, 2004; OMS, 2000) contenant un mélange de sucre, farine de céréales, minéraux, vitamines et lait écrémé (selon la composition montrée dans le tableau 8) qui n'a pas pour but de faire gagner du poids au patient mais seulement d'assurer les besoins métaboliques de base.

Tableau 8 : Composition de la préparation F75 (Briend, 1998).

Nutriment	Quantité pour 1 litre de F75
Lait écrémé en poudre	25 g
Sucre	60 g
Huile	25 g
Farine de riz (ou autre céréale) cuite	50 g
Supplément vitaminique et minéral	3,2 g
Porter au litre avec de l'eau (non minéralisée)	

L'organisme de la personne mal nourrie souffrant de multiples insuffisances, il faut administrer des repas fréquents en petites quantités. Le tableau 9 montre que le protocole de prise en charge de l'enfant malnutri prévoit de réduire progressivement la fréquence des repas tout en augmentant la quantité.

Il faut noter que l'on administre les mêmes produits aux enfants et aux adultes qui eux sont nourris en général par sonde nasogastrique

Tableau 9 : Protocole OMS pour la renutrition chez l'enfant lors de la phase de stabilisation (Ashworth, 2004).

Jours	Fréquence	Vol/kg/repas	Vol/kg/jour
1-2	Toutes les 2 h	11 mL	130 mL
3-5	Toutes les 3 h	16 mL	130 mL
6-7+	Toutes les 4 h	22 mL	130 mL

En 2004, l'Organisation mondiale de la santé a publié des directives pour le traitement hospitalier des enfants malnutris (Ashworth *et al.*, 2004). Différents protocoles de traitement sont prévus : correction des autres carences (fer, vitamine A, B1, B2, B9, C, iode) et correction des infections et parasitoses associées. Il est prévu une administration systématique d'un antibiotique à large spectre ainsi que la vaccination contre la rougeole. De plus, en cas d'infection particulière, il faut ajouter le traitement adéquat (comme un traitement antipaludéen).

- Traitement et/ou prévention d'une hypoglycémie.

Si le patient arrive conscient, un bolus de glucose ou saccharose à 10 % doit être administré. Le patient est ensuite nourri avec la solution F75. Si le patient est inconscient, on précède ce protocole par une perfusion intraveineuse de glucose 10 % (5 mL/kg). Il faut surveiller régulièrement la glycémie, la température rectale (l'hypoglycémie va de paire avec l'hypothermie) et l'état de conscience du patient.

- Traitement et/ou prévention d'une hypothermie.

Un malade présente une hypothermie lorsque sa température rectale est inférieure à 35,5 °C. Il faut le réalimenter et le réchauffer, avec une surveillance régulière de sa température et de sa glycémie.

La phase de récupération permet une prise de poids rapide, elle commence dès que l'appétit est revenu. La préparation F75 est remplacée progressivement par la préparation F100 (Tableau 10).

Tableau 10 : Composition de la préparation F100 (Briend, 1998).

Nutriment	Quantité pour 1 litre de F100
Lait écrémé en poudre	80 g
Sucre	50 g
Huile	60 g
Supplément vitaminique et minéral	3,2 g
Porter au litre avec de l'eau (non minéralisée)	

Cette préparation F100 contient 100 kcal/100 mL et 2,9 g de protéines/100 mL. La transition se fait sur 2 jours durant lesquels on remplace F75 par la même quantité de F100, puis les repas sont augmentés de 10 mL jusqu'à atteindre environ 30 mL/kg/j (Ashworth, 2004).

1.2.4) Malnutritions protéino-énergétiques de l'adulte.

La malnutrition protéino-énergétique, bien que plus souvent rencontrée chez l'enfant peut pourtant toucher les adultes. Ceux-ci peuvent être atteints de Kwashiorkor ou de Marasme.

1.2.4.1) Kwashiorkor chez l'adulte.

Le Kwashiorkor est une pathologie assez rare chez l'adulte, mais il arrive pourtant qu'elle touche les personnes souffrant d'une carence protéique chronique. Les symptômes sont identiques à ceux du jeune enfant, auxquels s'ajoute une tension artérielle faible.

1.2.4.2) Marasme chez l'adulte

Contrairement au kwashiorkor qui est rare, le marasme est plus fréquent chez l'adulte et résulte de cinq causes principales : un apport alimentaire, une infection chronique (VIH,

tuberculose, ...), un syndrome de malabsorption dû à des causes diverses (maladies cœliaques...), un cancer ou des troubles du comportement alimentaire.

1.3) Cartographie mondiale de la faim

La cartographie mondiale de la faim montre les pays en état de précarité nutritionnelle et les facteurs jouant un rôle sur cette carte. Ces facteurs peuvent être d'origine naturelle (catastrophe naturelle, réchauffement climatique), ou humaine (guerre).

1.3.1) Etat des lieux en 2012

Le 8 septembre 2000, 193 états membres de l'ONU et 23 organisations internationales ont participé au « Sommet du millénaire pour le développement ». Cette rencontre a permis de mettre en évidence le fait qu'à travers le monde, certains besoins pourtant fondamentaux restaient encore inaccessibles à une grande partie de la population. De ce constat découlaient huit objectifs majeurs à atteindre d'ici 2015 (FAO, 2010).

- Objectif 1 : Réduire l'extrême pauvreté et la faim.
- Objectif 2 : Assurer l'éducation primaire pour tous.
- Objectif 3 : Promouvoir l'égalité des sexes et l'autonomisation des femmes.
- Objectif 4 : Réduire la mortalité infantile.
- Objectif 5 : Améliorer la santé maternelle.
- Objectif 6 : Combattre le VIH/sida, le paludisme et d'autres maladies.
- Objectif 7 : Préserver l'environnement.
- Objectif 8 : Mettre en place un partenariat mondial pour le développement.

Celui qui nous intéresse ici est l'objectif n°1 : éradiquer l'extrême pauvreté et la faim. L'objectif, fixé entre 1990 et 2015, était de réduire de moitié les populations souffrant de la faim, soit de passer de 800 millions en 1990-1992 à 400 millions d'individus sous alimentés en 2015. Comme le montre la figure 2, l'objectif est encore loin d'être rempli : la FAO (Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture) estime à 925 millions le nombre d'individus souffrant de la faim en 2010 contre 1,023 milliards en 2009 (FAO, 2010), ce qui fait un recul de 98 millions de personnes en un an (ou -9,6%), pourtant insuffisant pour atteindre l'objectif fixé. Le nombre de mal nourris a connu une recrudescence entre 2000 et 2009.

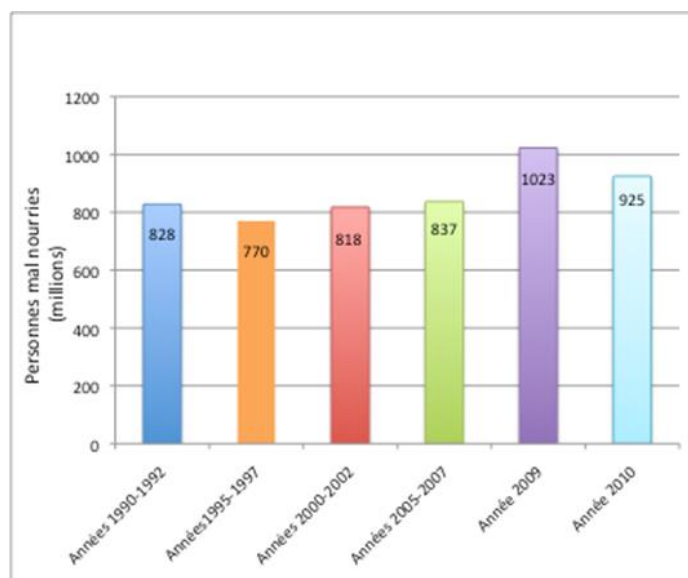


Figure 2 : Nombre de mal-nourris dans le monde entre 1990 et 2010 (Nations Unies, 2011).

La figure 3 matérialise l'évolution vers l'objectif des différents pays du globe. Les pays qui ne pourront pas atteindre les chiffres fixés se situent majoritairement en Afrique centrale et en Asie du Sud. L'Asie Est et Sud-Est, une grande partie de l'Amérique du Sud, une partie de l'Afrique centrale ainsi que une partie de l'Afrique de l'Est pourraient atteindre l'objectif si leur progression continue.

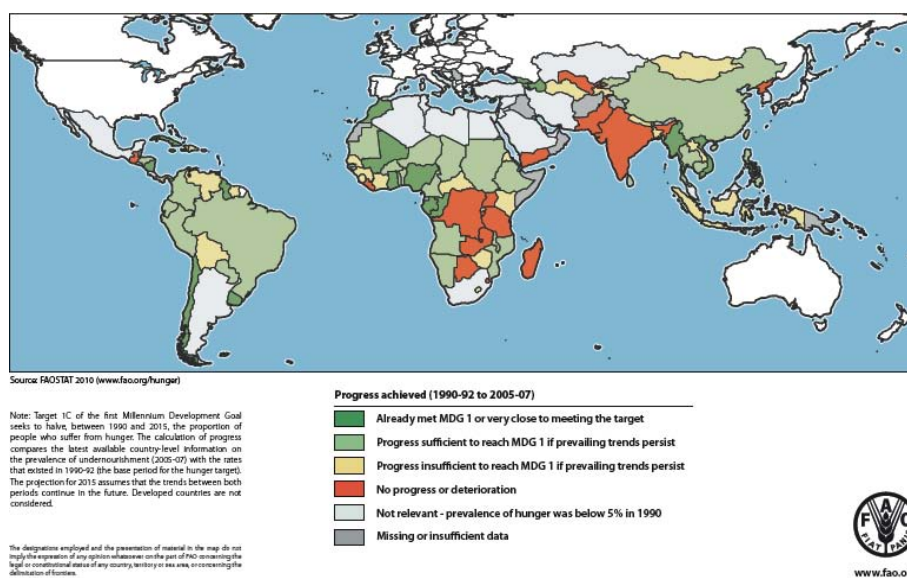


Figure 3 : Progrès constatés au niveau mondial pour atteindre l'objectif de réduction de l'extrême pauvreté et de la faim (FAO, 2010).

Les individus mal nourris se situent à 98% dans les pays en développement, et ils représentent 16% de la population mondiale en 2010 (FAO, 2010) (Figure 4).

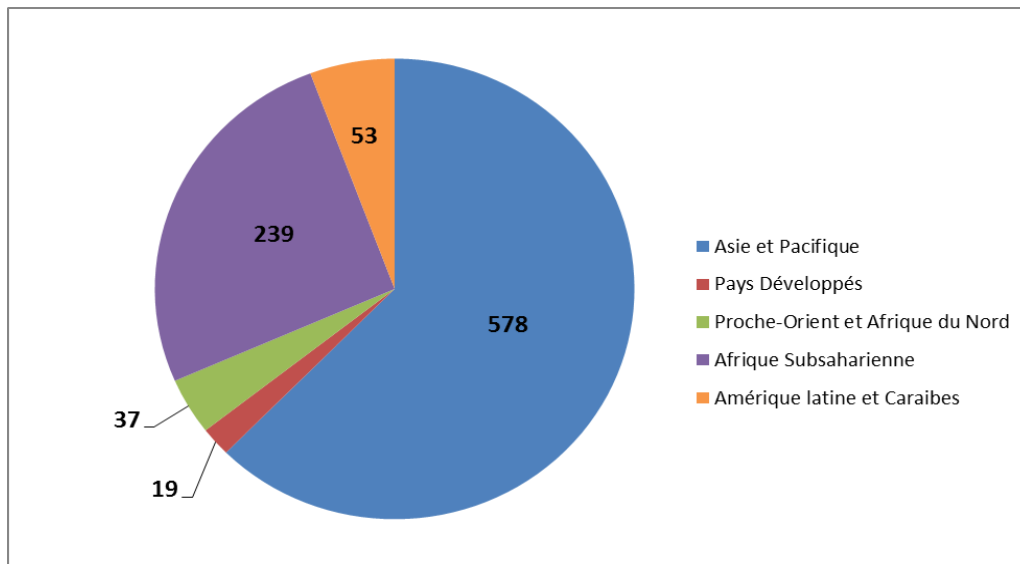


Figure 4 : Sous-alimentation dans le monde par région (en millions) (United Nations World Food, 2010).

La plus grosse proportion de personnes malnutries se trouve dans la région Asie et Pacifique avec 578 millions de sous alimentés mais c’est aussi la région où on constate la plus forte baisse de personnes malnutries entre 2009 et 2010 : 658 millions en 2009 contre 578 en 2010, ce qui fait une baisse de 12 % en une année, ceci en grande partie grâce aux progrès de la Chine, de l’Indonésie et des Philippines. L’Afrique subsaharienne vient en seconde position avec 239 millions de sous-alimentés mais c’est là que le pourcentage de population touchée est le plus élevé (30%) (Nations unies, 2011).

Selon la carte de la faim dans le monde présentée par le programme alimentaire mondial (Figure 5), les forts taux de personnes sous-alimentées se concentrent dans les pays en voie de développement et dans les pays en transition. Deux tiers de la population mal nourrie se concentrent principalement dans sept pays : Bangladesh, Chine, République démocratique du Congo, Ethiopie, Inde, Indonésie et Pakistan (FAO, 2010).

Les zones industrialisées (Europe, Asie de l’Ouest, Afrique du Nord, Australie et Nouvelle Zélande, Amérique du Nord et une partie de l’Amérique latine) ont un pourcentage de malnutrition faible (moins de 5%). Cela correspond à des catégories de population particulières comme les marginaux, les personnes vivant sous le seuil de pauvreté, certaines personnes âgées ou personnes atteintes de certaines pathologies.

Les pays où la malnutrition atteint des taux dramatiquement élevés (supérieurs à 35%) se concentrent exclusivement en Afrique centrale (Tchad, Ethiopie, Zambie, République Démocratique du Congo, Malawi, Angola,...). Ces fortes proportions s’expliquent par la

combinaison de plusieurs facteurs. En premier lieu, c'est en Afrique que l'accroissement de population est le plus fort avec un taux de croissance démographique de 22,8 % (Estimations INED 2012). En effet, le manque d'accès à l'éducation et aux divers moyens de contraception entraîne donc un nombre élevé d'enfants par femme (4,39 enfants/femme) (Estimations INED 2012) et un taux de natalité supérieur au taux de mortalité, même si celui-ci est très élevé.

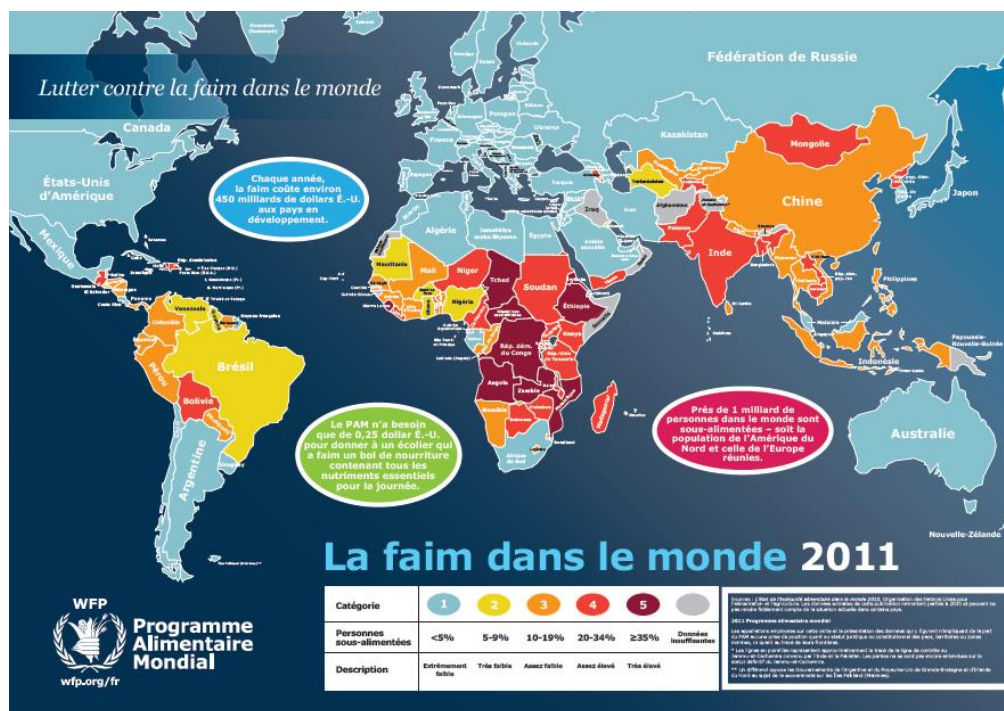


Figure 5 : Carte de la faim dans le monde en 2011 (Programme alimentaire mondial, 2011).

Deuxièmement, c'est dans cette partie du monde que la présence des différents facteurs de risques pouvant majorer la malnutrition se fait le plus sentir : contraintes climatiques (sécheresse, catastrophes diverses, ...), conflits inter ou intra territoriaux provoquant des mouvements de populations, présence de nombreuses maladies qui entretiennent la malnutrition.

Le reste de l'Afrique semble relativement moins touché, avec cependant des taux de malnutrition allant de 5 à 34 % selon les pays en Afrique de l'Ouest. Comme mentionné plus haut, l'Afrique du Nord et l'Afrique du Sud sont épargnées.

Sur le continent asiatique, l'Asie du Sud et l'Asie du Sud-est présentent également un fort taux de malnutrition : de 10 à 34 % selon les pays.

En Amérique Latine, les plus forts taux de malnutrition se concentrent au nord et au centre du continent.

1.3.2) Facteurs influant la cartographie de la faim.

1.3.2.1) Facteurs climatiques.

Le rapport édité en 2012 par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) sur « *La gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique* » expose les différents facteurs qui pénaliseront surtout les pays déjà très vulnérables situés en Afrique, Asie et Amérique du Sud, à quelques exceptions ponctuelles près (comme la sécheresse qui s'est abattue sur la Russie en 2010). En effet, ces pays tirent une partie conséquente de leurs revenus de l'agriculture et l'élevage, et ce sont principalement ces deux activités qui pâtissent de changements climatiques. De plus des événements climatiques extrêmes tels que sécheresses, inondations, ouragans entraînent des déplacements massifs de populations avec un stress hydrique accru et un accès à la nourriture très limité presque totalement dépendant des divers organismes d'aide alimentaire.

- Une augmentation des températures moyennes est attendue au niveau mondial : 0,2 °C par décennie durant les 20 prochaines années et les différentes études s'accordent toutes à dire que la hausse s'accentuera encore et diminuera les rendements agricoles (Pachauri et Reisinger, 2007).
- Tout comme les températures, les précipitations vont augmenter à l'échelle mondiale. Les zones où le volume des précipitations augmentera verront un risque accru d'inondations, d'où un risque d'atteinte des points d'eau douce avec insalubrité et augmentation des maladies diarrhéiques.
- Les épisodes de sécheresse et les vagues de chaleur gagneront en fréquence, en durée et en intensité. Les conséquences seront une baisse quantitative et qualitative de l'eau douce, ainsi que des pénuries de nourriture. Le plus préoccupant est que les zones touchées seront celles qui sont déjà aujourd'hui les plus vulnérables (notamment Afrique) et qui concentrent déjà la plupart des personnes mal nourries de la planète.
- La hausse du niveau des mers va se poursuivre. Les effets attendus seront une fréquence accrue d'inondations des zones côtières et des deltas, une érosion plus rapide des côtes mondiales et surtout un phénomène de salinisation des terres cultivables et des nappes d'eau douce à proximité.
- Les changements de climat provoqueront également l'apparition de parasites touchant les plantes ou les animaux, ainsi que des changements de répartition géographique des maladies à transmission vectorielles.

1.3.2.3) Facteurs humains.

Les conflits armés responsables d'exode de population portent le plus à conséquence sur les problèmes de dénutrition et de malnutrition. On peut citer les exemples récents des conflits du Moyen Orient comme la Syrie ou encore les conflits qui perdurent dans certaines régions depuis des années comme en Iraq ou encore en Afghanistan. Ces deux pays constituent à eux seuls 4,7 millions de réfugiés avec 3 millions de personnes en Afghanistan et 1,7 millions pour l'Iraq sur les 43 millions de déplacés dans le monde. On peut également citer le conflit Israélo-Palestinien pour lequel on dénombre 4,8 millions de réfugiés (Nations Unies, 2011). Il faut également citer les conflits ravageant l'Afrique.

1.4) Evolution de la démographie mondiale dans les décennies à venir.

Selon les estimations 2012 de l'Institut national d'études démographiques, la population mondiale s'élève aujourd'hui à 7 milliards d'habitants et la croissance démographique se poursuivra dans les décennies à venir. D'après les scénarios moyens (Figure 6), la population mondiale dépasserait les 9,3 milliards d'ici à 2050, et les 10,1 milliards d'habitants en 2100 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2011).

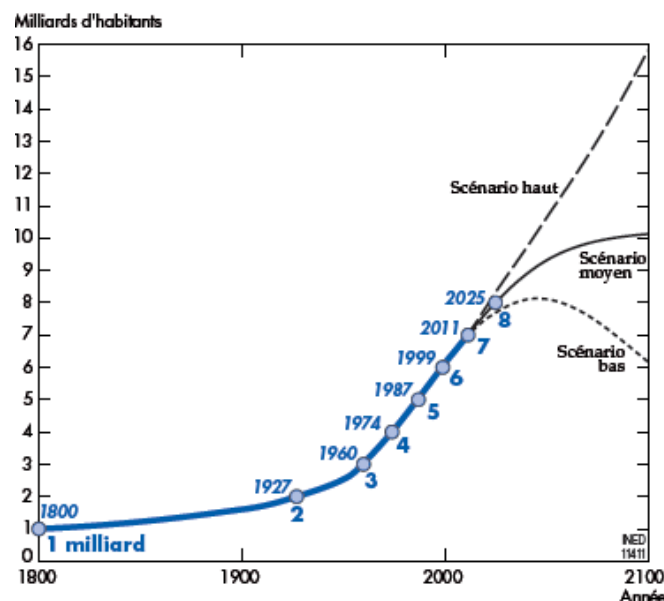


Figure 6 : Evolution de la population mondiale depuis 1800 et projections jusqu'en 2100 (Pison, 2011)

L'Asie concentre 60,4% (Nations Unies, 2011) de la population mondiale en 2010. Comme le montre la figure 7, l'Asie restera un pôle démographique majeur dans les décennies à venir. Cependant, dans cette région, deux grandes tendances démographiques s'opposent:

- Un ralentissement de la croissance démographique en Asie Est et Sud-est¹(+0,7% en moyenne en 2005-2010 (Attané et Barbieri, 2009), sous l'impulsion majoritairement de la Chine et dans une moindre mesure, du Japon. Cette région passerait de 2,17 milliards d'habitants (INED, 2012) à 2,36 milliards en 2050 (Attané et Barbieri, 2009).
- Une poursuite de la croissance démographique en Asie du Sud² avec l'Inde comme chef de file (Véron, 2008). D'ici à 2050, l'Inde devrait dépasser la Chine en terme de population (Nations Unies, 2011).

Selon les scénarios moyens, la croissance du continent Asiatique ralentirait en 2050 (5,14 milliards d'habitants) puis amorcerait une diminution (4,6 milliards d'habitants en 2100).

L'Afrique est la région du monde où la croissance démographique sera la plus forte, certains pays allant même jusqu'à doubler ou tripler leur population (Tabutin et Schoumaker, 2004).

La population, qui a dépassé le milliard en 2010, devrait atteindre 2,12 milliards en 2050 et 3,57 milliards en 2100 (Nations Unies, 2011). L'Afrique concentrerait alors 35,3 % de la population mondiale contre 45,4 % en Asie. Ce sont là les deux grandes régions à observer dans les décennies à venir.

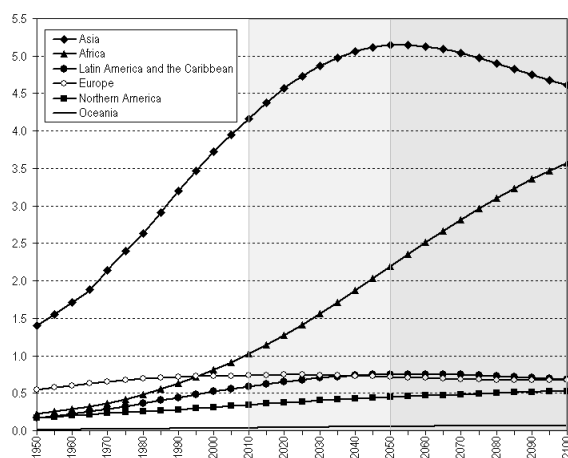


Figure 7 : Estimations et projections de la population mondiale par régions, selon les scénarios moyens, entre 1950 et 2100 (Nations Unies, 2011).

L'Europe a déjà amorcé sa phase de décroissance démographique, due au faible taux de natalité ce qui entraîne un vieillissement de sa population. Celle-ci, 739 millions en 2011, passerait à 675 millions en 2100 (Nations Unies, 2011).

¹ D'après Attané et Barbieri, l'Asie de l'Est est composée de la Chine, des Corées du Nord et du Sud, du Japon et de la Mongolie. L'Asie du Sud-est regroupe Brunei, le Cambodge, l'Indonésie, le Laos, la Malaisie, Myanmar, les Philippines, Singapour, le Timor oriental, la Thaïlande et le Vietnam.

² D'après Véron, l'Asie du Sud est composée de l'Afghanistan, du Bangladesh, du Bhoutan, de l'Inde, des Maldives, du Népal, du Pakistan et du Sri Lanka.

L'Océanie et l'Amérique du Nord maintiendront une croissance démographique faible mais régulière, d'où une augmentation de leur population mais dans une bien moindre mesure que l'Asie et l'Afrique (l'Amérique du Nord comptait, en 2011, 348 millions d'habitants et atteindrait 675 millions en 2100) (Nations Unies, 2011).

L'Amérique du Sud stabiliserait sa croissance démographique vers 2050 (869 millions d'habitants) puis amorcerait une décroissance (688 millions d'habitants en 2100) (Nations Unies, 2011).

2) Deuxième partie : l'insecte

La seconde partie permet de définir ce qu'est un insecte : quelle place occupe-t-il dans le règne animal, quelles sont les caractéristiques d'un insecte et comment se développe-t-il ?

J'ai ensuite tenté de situer les insectes comestibles dans le monde et de déterminer quels sont les plus consommés au travers de quelques exemples.

Je me suis enfin intéressée aux teneurs protéiques et énergétiques des différents ordres d'insectes et j'ai établi une comparaison avec les valeurs trouvées chez les animaux d'élevage classique.

2.1) L'insecte.

Pour pouvoir utiliser l'insecte comme un animal d'élevage à part entière, il est nécessaire de connaître sa répartition mondiale, ses différents modes de développement et de déterminer les espèces susceptibles d'égaliser, en terme d'apports protéiques et énergétiques, les sources de protéines animales utilisées actuellement.

2.1.1) La place des insectes dans le règne animal.

La classification traditionnelle établit que le monde vivant est séparé en règnes. Un règne est divisé en plusieurs embranchements, eux-mêmes divisés en classes. Une classe se compose de plusieurs ordres eux-mêmes découpés en familles dans lesquelles on retrouve les différents genres puis espèces.

Les insectes font partie du règne animal et appartiennent à l'embranchement des arthropodes. Cet embranchement regroupe des animaux invertébrés dont le corps est composé de métamères et dont les appendices sont articulés (d'où le nom Arthropode : il provient du grec *arthron* qui signifie articulation, et de *podos* qui veut dire pied). Les arthropodes sont recouverts d'un squelette externe composé de chitine. Parmi les arthropodes, ceux qui comptent 3 paires de pattes forment la classe des insectes.

Une classification des ordres majeurs (Fraval et d'Aguilar, 2004 ; Leraut, 2003 ; Roth, 1980) est présentée en Annexe 1. Les ordres principaux sont les Coléoptères, les Lépidoptères, les Hyménoptères, les Diptères, les Orthoptères, les Hémiptères, les Isoptères et les Odonatoptères.

Actuellement, environ 1 million d'espèces d'insectes ont déjà été décrites. Les entomologistes estiment qu'il en reste au moins autant à découvrir. Une trentaine d'ordres sont recensés à travers le monde mais quatre d'entre eux regroupent 80 % des espèces de la planète : les

coléoptères représentent environ 300 000 espèces, les diptères regroupent environ 150 000 espèces, puis viennent les hyménoptères avec approximativement 125 000 espèces et enfin les lépidoptères avec environ 120 000 espèces (Albouy, 2011 ; Chinery, 2005 ; Leraut, 2003).

La classe des insectes est, dans le règne animal, celle qui présente le plus de diversité. D'un point de vue écologique, les insectes ont colonisé presque tous les écosystèmes, que ce soit dans les déserts, sous les tropiques, en climat tempéré ..., à l'exception des régions polaires et des eaux profondes (Leraut, 2003). C'est aussi la classe présentant la plus grande variabilité morphologique, avec des individus aux multiples formes, tailles, couleurs. Certains sont diurnes, d'autres nocturnes. Certains sont omnivores et d'autres strictement herbivores ...

2.1.2) Les stades d'évolution de l'insecte.

L'insecte possède un squelette externe divisé en segments (nombre variable) et plus ou moins développés en fonction de l'ordre et de la fonction de l'insecte (Beverley et Ponsonby, 2003). Ces segments sont regroupés en 3 sections distinctes : la tête, le thorax et l'abdomen.

- La tête est composée de 6 segments fusionnés : elle porte les pièces buccales, les yeux et les antennes.
- Le thorax se divise en 3 sous-parties : le prothorax, le mésothorax et le métathorax. Chacun porte une paire de pattes et les 2 derniers segments peuvent posséder chacun une paire d'ailes. En fonction des ordres et des espèces, les différents segments sont plus ou moins développés.
- L'insecte possède 3 paires de pattes (un des éléments de définition de cette classe).
- L'abdomen contient l'appareil reproducteur et peut avoir un appendice (crochet, dard, ...).

La vie d'un insecte débute au stade d'œuf, puis il subit des transformations pour atteindre le stade d'adulte ou imago (l'imago correspond à l'état de l'insecte quand celui-ci a atteint sa forme définitive et qu'il est capable de se reproduire). Durant toute sa phase de croissance, l'insecte grandit mais est prisonnier de son exosquelette externe qui, lui n'évolue pas. L'insecte va ainsi subir des mues successives pour pouvoir atteindre sa forme adulte.

Il existe en fonction de l'espèce deux grands types de développement : hétérométabole et holométabole (Robert, 2001).

- Développement hétérométabole.

La figure 8 matérialise les différents stades de développement par lesquels passe un insecte de type hétérométabole. Lorsque l'œuf éclot, il en sort une larve qui ressemble

morphologiquement à l'imago sauf au niveau de la taille et de la maturation sexuelle. L'individu passe par des stades juvéniles entrecoupés de mues permettant la croissance et la maturation. Le dernier stade est une mue imaginale : c'est à ce stade que l'insecte est totalement mature.

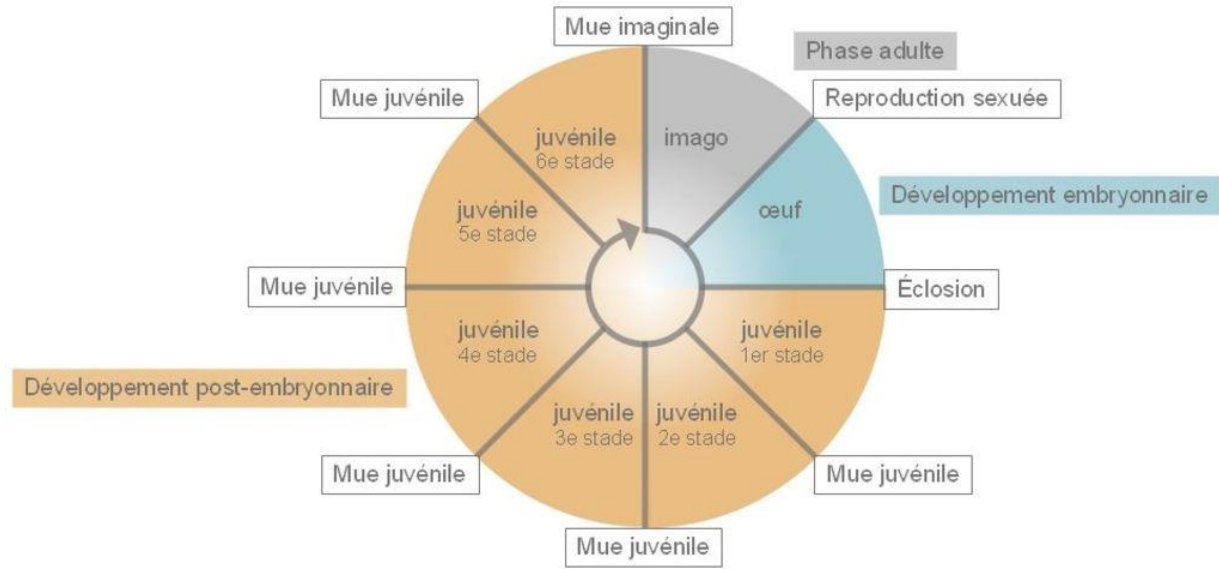


Figure 8 : Représentation du cycle de développement d'un insecte hétérométabole (codexvirtualis.fr, 2013).

On peut distinguer quatre sous-types dans le développement hétérométabole (Fraval et d'Aguilar, 2003) :

- L'amétabolie est la forme de développement caractérisant les insectes aptérygotes (c'est-à-dire qu'ils n'ont jamais développé d'ailes). L'insecte sortant de l'œuf est semblable à l'adulte. Il n'a que la maturité sexuelle à acquérir.
- La paurométabolie se rencontre lorsque la larve et l'adulte évoluent dans le même milieu. Ce développement caractérise notamment les ordres des Orthoptères, des Psocoptères, des Hémiptères et des Hétéroptères.
- L'hémimétabolie caractérise, entre autre, l'ordre des Odonatoptères et celui des Plécoptères. Ce terme est employé lorsque la larve a un développement aquatique alors que l'adulte évolue en milieu aérien.
- La paléométabolie se rencontre quand le dernier stade juvénile avant l'adulte vole avant de faire sa dernière mue. C'est le mode de développement des Ephéméroptères.

- Développement holométabole.

Dans le type de développement appelé holométabole, l'insecte passe par 4 stades bien distincts : Œuf-Larve-Nymphe-Imago (Figure 9). L'une des particularités de ce cycle est que

la biologie de la larve est complètement différente de celle de l'adulte. La larve accumule des réserves pour se préparer au stade nymphal. Lors de ce stade nymphal, l'insecte subit des modifications et des remaniements intenses aussi bien internes qu'externes. Cette phase est une phase d'immobilité et d'absence de nourriture. L'insecte qui sort de la nymphe ne ressemble en rien à celui qu'il présentait à l'état larvaire.

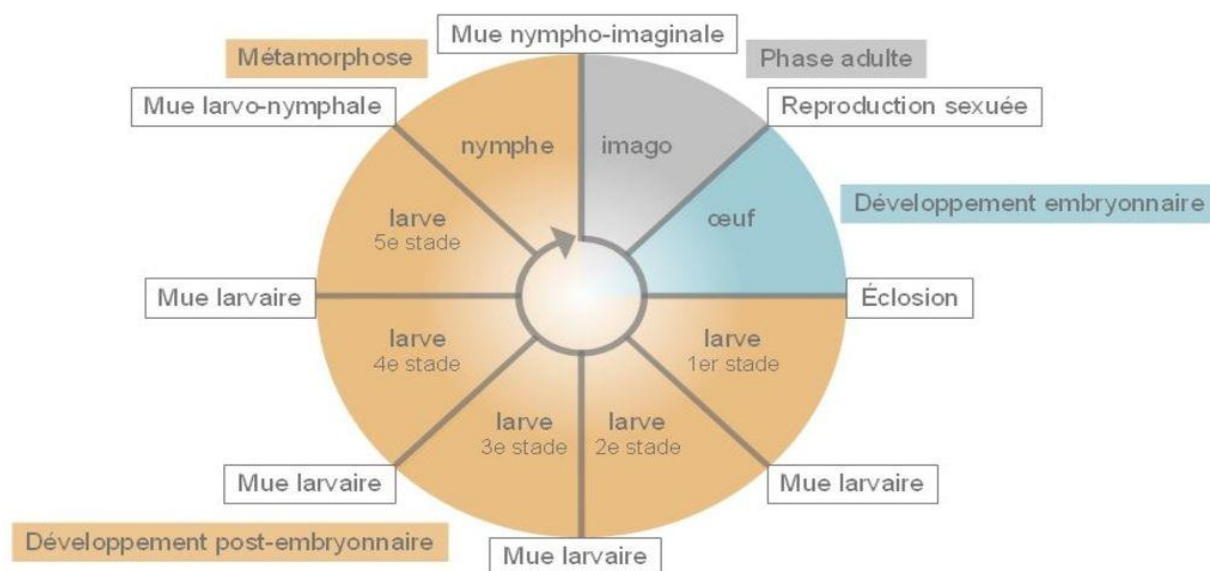


Figure 9 : Représentation du cycle de développement d'un insecte holométabole (codexvirtualis.fr, 2013).

Ce développement holométabole est retrouvé entre autres chez les coléoptères, les hyménoptères, les lépidoptères et les diptères.

Le cycle de développement d'un insecte définit les formes sous lesquelles celui-ci peut être consommé. Chez les espèces hétérométaboles (notamment criquets, grillons, termites et libellules), ce sont les stades nymphe et/ou adulte qui sont mangés, alors que chez les espèces holométaboles (telles que papillons, abeilles et mouches), ce sont les stades larve et/ou pupa qui sont consommables (DeFoliart *in* Resh et Cardé, 2003).

2.2) Répartition mondiale des insectes comestibles et des régions pratiquant l'entomophagie.

À un moment ou un autre de l'Histoire, l'entomophagie a été pratiquée sur la plupart des continents. Plus de 300 peuples consomment des insectes: dans le cadre d'un rite religieux, lors de fêtes, pour honorer un dignitaire, mais aussi comme composant du régime alimentaire

quotidien ou en cas de famine (Johnson, 2010). Cependant toutes les espèces comestibles ne sont pas consommées soit à cause de leur mauvais goût, soit de leur faible disponibilité.

Il existe en 2012, à travers le monde, plus de 2000 espèces d'insectes consommées par l'homme dans 113 pays (Jongema *in* Rumpold et Schlüter, 2012). Jongema (*in* Rumpold et Schlüter, 2012) a établi une synthèse de toutes les recherches menées pour identifier les espèces comestibles à l'échelle mondiale (Annexe 2). Il s'est basé sur la liste éditée en Mars 2012 par le laboratoire d'entomologie de l'Université de Wageningen, aux Pays-Bas

(http://www.wageningenur.nl/upload_mm/8/4/4/1621cf7e-2f55-4961-b3c9-5d321e4ba887_Worldlistofedibleinsectspecies42012.pdf site consulté le 07/04/2013).

La figure 10 présente sous forme de carte la répartition géographique énoncée dans le tableau 11 : les espèces comestibles se trouvent majoritairement au Mexique et en Amérique du Sud, en Asie Est et Sud-Est, dans les îles Pacifique, l'Océanie, et en Afrique centrale.

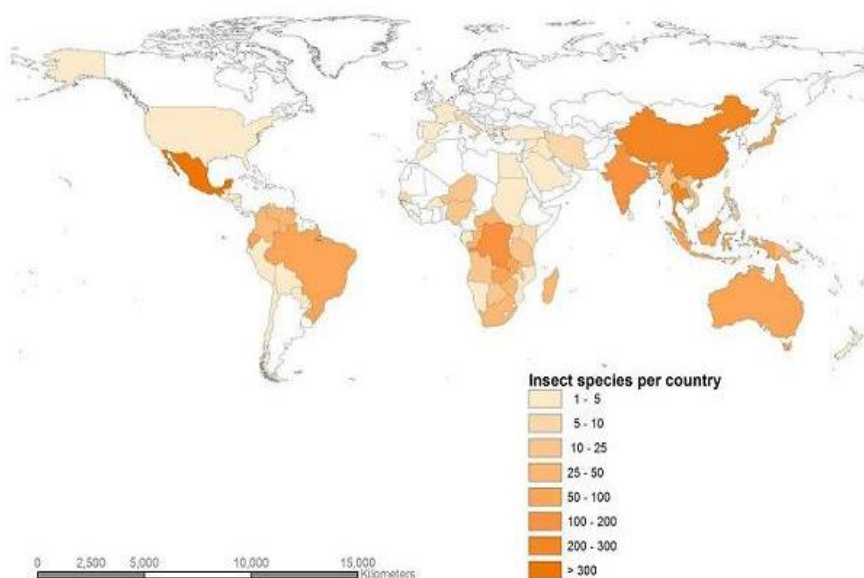


Figure 10: Nombre d'espèces d'insectes comestibles répertoriés à travers le monde par grandes régions. (<http://www.fao.org/forestry/edibleinsects/65425/en/>, 2012).

Ramos-Elorduy (*in* Johnson, 2010) a établi que le continent américain abrite le plus grand nombre d'espèces comestibles (39 %), suivie de l'Afrique (30 %) et de l'Asie (20 %).

Ces données sont cependant relatives car l'inventaire des insectes comestibles est encore très incomplet dans certaines régions. De plus, il y a également un problème d'harmonisation entre la classification scientifique de nombreux insectes (classification de Linné) et la dénomination attribuée par les autochtones, ce qui peut créer des confusions (un même nom vernaculaire pouvant être utilisé pour désigner plusieurs espèces) (Louey Yen, 2010).

Le continent américain est le plus riche en espèces comestibles, qui sont retrouvées en grande partie en Amérique du Sud et au Mexique. Le Mexique a mis en place un vaste pôle de recherche en entomophagie : selon l'institut de Biologie de l'UNAM (Université Nationale Autonome du Mexique), 549 espèces comestibles ont été recensées (Ramos-Elorduy *et al.*, 2009 ; 2011 ; Ramos-Elorduy, 2006).

Paoletti et Dufour (2005) ont tenté de répertorier les espèces comestibles en Amazonie et en Amérique du sud en général. Le fait que peu de pays nord-américains soient consommateurs d'insectes traduit le fait que, dans les régions les plus industrialisées, l'entomophagie ne fait pas partie de leur culture. L'insecte est assimilé à un nuisible et est synonyme de saleté et de maladie. Il faut également mentionner le climat, beaucoup plus froid au Nord, et qui empêche ou ralentit la reproduction et le développement des insectes.

L'Afrique présente actuellement 524 espèces comestibles et 36 pays consommateurs (Ramos-Elorduy *in* Johnson, 2010), majoritairement dans les régions centrale et australe (209 espèces majoritairement consommées en Afrique Sub-saharienne (Illgner et Nel, 2000). Ceci est en premier lieu dû au fait que, en de nombreuses régions d'Afrique, l'entomophagie fait partie intégrante des traditions. Les espèces consommées varient en fonction des peuples. Ainsi certains peuples de la République Démocratique du Congo comme les Yombe considèrent la consommation de toutes les chenilles comme taboue et chez les Rega, les femmes enceintes ne sont pas autorisées à consommer un certain type de chenilles.

En troisième position vient l'Asie, avec 349 espèces comestibles et 29 pays consommateurs d'insectes (Ramos-Elorduy *in* Johnson, 2010). Comme souligné précédemment, il est très probable que le nombre d'espèces comestibles en Asie soit supérieur à celui cité mais certains pays ont été beaucoup mieux étudiés que d'autres. L'Asie du Sud-Est (Indonésie, Laos, Malaisie, Myanmar, Philippines et Vietnam) regrouperait 150 à 200 espèces comestibles (Johnson, 2010 ; Schabel, 2010). Cette zone est, avec l'Afrique, une de celles où l'entomophagie est la plus active. Une étude menée en 2005 estime à 164 le nombre d'espèces consommées dans la région regroupant le Laos, la Myanmar, le Vietnam et la Thaïlande (Viwalpanish et Yhoung-aree, 2005) ; cette dernière étant probablement un des pays les mieux étudiés en terme d'entomophagie (Hanboonsong, 2010 ; Leksawasdi, 2010 ; Yhoung-aree, 2010). La Thaïlande compte plus de 150 espèces comestibles, dont 50 sont consommées communément. L'entomophagie est pratiquée partout mais est plus populaire dans les régions Nord et Est (Sirimungkararat *et al.*, 2010).

Au Laos, une étude a été menée entre 1996 et 2006 avec pour sujet l'importance des produits forestiers non ligneux comestibles (ce sont les produits d'origine biologique, autres que le

bois, qui sont extraits des forêts, des zones boisées ou des arbres seuls et qui sont utilisés par l'Homme dans divers domaines (Dykstra et Heinrich, 1996)) dans le quotidien du village de Dong Makkhai (Boulidam, 2010). Elle a montré que dans ce village, 21 espèces d'insectes étaient consommées et vendues. La consommation d'insectes est donc une source de nourriture appréciée qui apporte un revenu financier supplémentaire pour les individus pratiquant la récolte.

La Chine compterait, selon une étude de Chen *et al.* (2009), 179 espèces comestibles, dont la consommation varie selon la disponibilité des différentes espèces et des préférences des habitants des différentes régions.

Les pays d'Asie du Sud (Inde, Népal, Pakistan et Sri Lanka.) compteraient 57 espèces comestibles mais cette région ne pratique que peu l'entomophagie pour des raisons culturelles et religieuses. L'insecte est surtout utilisé pour nourrir les élevages (Johnson, 2010).

Il faut également citer les îles de la région Pacifique (39 espèces consommées) (Johnson, 2010) et la Papouasie-Nouvelle-Guinée où les habitants mangent régulièrement des insectes mais cette région fait partie de celles où peu d'études ont été réalisées. Dans le cas de la Papouasie-Nouvelle-Guinée, selon l'étude réalisée par Ramandey et Van Mastrigt (2010), le nombre d'espèces consommées par les populations locales serait estimé entre 60 et 100.

2.3) Quels ordres d'insectes sont les plus consommés ? À quels stades ?

Les espèces d'insectes consommées appartiennent à 80 % à quatre ordres principaux (Johnson, 2010) (Figure 11):

- L'ordre des Coléoptères (scarabées) avec 468 espèces comestibles dans le monde.
- L'ordre des Hyménoptères (fourmis, abeilles et guêpes) qui compte 351 espèces comestibles.
- L'ordre des Orthoptères (criquets, sauterelles et blattes) avec 267 espèces comestibles.
- L'ordre des Lépidoptères (papillons et mites) comptant 253 espèces comestibles.

Puis viennent l'ordre des Hémiptères (180 espèces), des Isoptères (61 espèces), des Diptères (34 espèces) et les Odonatoptères (29 espèces).

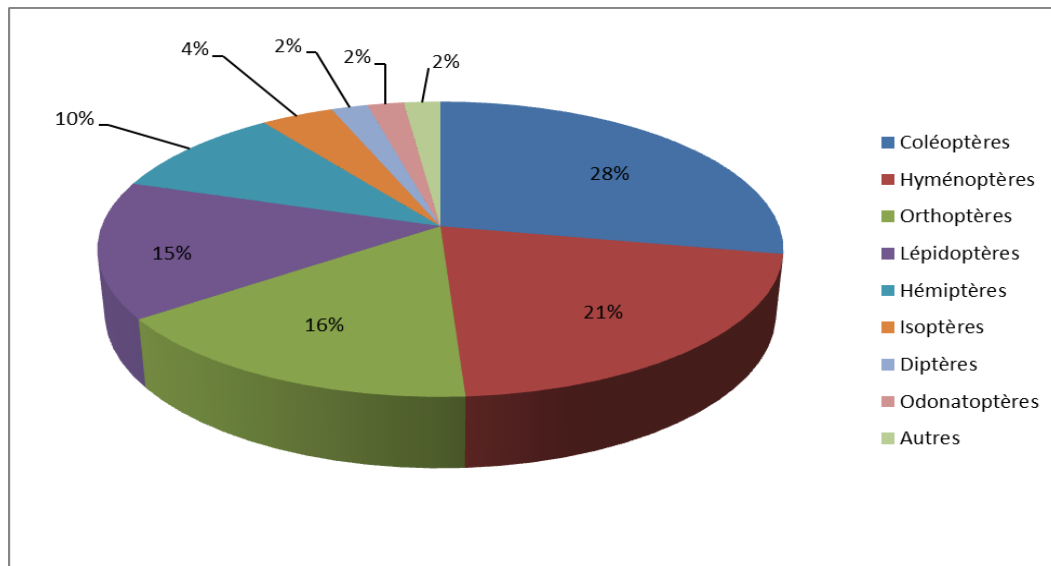


Figure 11 : Pourcentage d'espèces comestibles par ordre (Johnson, 2010).

2.3.1) L'ordre des Coléoptères.

Il existe dans le monde plus de 300 000 espèces de coléoptères (D'Aguilar et Fraval, 2004), dont 468 sont répertoriées comme étant comestibles (Ramos-Elorduy *in* Johnson, 2010). Les coléoptères sont des insectes holométaboles avec un cycle de développement œuf-larve-nymphé-imago. En général, c'est le stade larvaire qui est consommé, même si tous les stades peuvent l'être. Lors de la consommation de l'imago, il faut enlever la tête, les pattes et autres parties dures (Defoliart, 2003).

Les coléoptères les plus consommés sont *Tenebrio molitor*, *Rhyncophorus* sp, *Oryctes rhinoceros* :

- *Tenebrio molitor*.

Aussi appelé ténébrion meunier, l'adulte est brun-noir et mesure entre 1,2 et 2 cm de long. Son cycle de développement varie en fonction de la température et le stade larvaire compte entre 8 et 20 cycles (Aguilar-Miranda *et al.*, 2002). La larve est de couleur orangée et peut mesurer jusqu'à 4 cm à maturité (Figure 12).



Figure 12 : Larve de *Tenebrio molitor* (Bellmann, 2006).

Tenebrio molitor est l'une des espèces les plus utilisées car il est très facile à élever. En particulier, développer un élevage nécessite très peu d'espace. De plus, l'espèce se caractérise par un développement et une reproduction rapide (OPIE, 2013). Le ver de farine est le stade larvaire de cette espèce, il se nourrit de farine ou autres céréales. Il est utilisé en nutrition humaine et pour nourrir les animaux.

- *Rhyncophorus* sp

Le genre *Rhyncophorus*, a pour arbre hôte le palmier. L'adulte (Figure 13) consomme les feuilles, fruits et fleurs. C'est un genre qui est très répandu. Il est consommé un peu partout dans le monde.



Figure 13 : Charançon rouge du palmier (Fraval, 2007).

La larve (Figure 14), qui se nourrit de matière en décomposition, est consommée en Afrique, en Asie et en Amérique (Fraval, 2007 ; Onyeike *et al.*, 2005; Paoletti, 1995). La larve est dodue, apode, d'une couleur blanc crème à ivoire et mesure entre 36 et 47 mm de long (EPPO, 2007).



Figure 14 : Larve de *Rhyncophorus ferrugineus* vue de dessous (photo de gauche) et de dessus (photo de droite) (EPPO, 2007).

Le genre *Rhyncophorus* permet une semi-culture : le peuple Asmat (Papouasie - Nouvelle-Guinée) récolte les larves de *Rhyncophorus bilineatus* et *Rhyncophorus ferrugineus* qui se nourrissent de la chair du palmier *Metroxylon Sagu*. Ils gardent quelques larves qu'ils implantent dans les palmiers proches des habitations. À l'approche d'une fête, ces palmiers sont abattus puis au bout de un à trois mois, on récolte les larves qui s'y sont développées. Celles-ci sont consommées comme un plat de fête (Paoletti, 1995 ; Johnson, 2010).

- *Oryctes rhinoceros*.

Consommé majoritairement en Asie et en Afrique (Onyrike *et al*, 2005), c'est un insecte qui doit son nom à sa corne caractéristique comme le montre la figure 15.



Figure 15 : Scarabée adulte (Central Plantation Crops Research Institute India, <http://www.issg.org/database/image.asp?ii=383&ic=e>).

Oryctes rhinoceros s'attaque en premier lieu au cocotier : de la même manière que *Rhyncophorus*, l'imago mange les feuilles et fleurs et la larve (Figure 16) se nourrit de la chair du cocotier en décomposition. Cet insecte peut également s'établir dans les palmiers, mais aussi se nourrir d'autres types de matières telles que les déchets provenant du cacao, du café, dans la paille en train de pourrir (Bedford, 1976).



Figure 16 : Larve d'*Oryctes rhinoceros* (Central Plantation Crops Research Institute India, <http://www.issg.org/database/image.asp?ii=381&ic=e>).

La larve passe par 3 stades de développement (celui-ci prend 2 à 4 mois (DeFoliart, 1997) et peut atteindre à maturité entre 11 et 12,2 mm de long. Au cours de cette évolution, la larve prend une teinte jaunâtre et se plisse (Hammes et Montsarrat, 1974). C'est au stade larvaire que cet insecte qui est consommé.

2.3.2) L'ordre des Hyménoptères.

Il existe 120 000 espèces décrites et 351 espèces comestibles au sein de l'ordre des Hyménoptères (Ramos-Elorduy *in* Johnson, 2010).

Comme dans le cas des coléoptères, ce sont les larves qui sont le plus consommées. Il faut ajouter aussi les pupes (enveloppe chitineuse des insectes à métamorphose complète pendant le stade nymphal). Chez les espèces comestibles, le stade adulte se mange également, cependant il n'est que peu consommé à cause de la présence du dard et de l'apitoxine injectée par celui-ci. Trois familles d'insectes sont ici concernées : la famille des Apidae (les abeilles), la famille des Vespidae (les guêpes), et la famille des Formicidae (les fourmis) :

- Famille des Apidae.

Les abeilles sont consommées un peu partout dans le monde. Les couvains, dont la récolte est montrée Figure 17 sont très recherchés : ils contiennent des larves, des pupes (nymphe sans aiguillon) et du miel. L'insecte était à l'origine consommé involontairement, car en consommant le miel, on ingérait en même temps quelques larves d'abeilles. Dans le cas des abeilles, la récolte d'insecte est un produit dérivé de la récolte de matière principale.



Figure 17 : Récolte de couvains d'*A. dorsata* (Adalla et Cervancia, 2010).

- Famille des Vespidae.

Les guêpes (Figure 18) sont beaucoup consommées en Chine (12 espèces de guêpes consommées dans la province du Yunnan (Ying *et al.*, 2010 ; Chen *et al.*, 2009) et au Japon (2 types de *Vespula* et 3 types de *Vespa* (Nonaka, 2010).



Figure 18 : *Vespula vulgaris* (Bellmann, 2006).

Comme pour les abeilles, ce sont surtout les larves et pupes qui sont consommées bien que les formes adultes soient également comestibles (Figure 19).



Figure 19: Larves de *Vespula vulgaris* (Bellmann, 2006).

Les nids de guêpes sont ramassés puis vidés : les larves et pupes sont extraites à la main une par une (Nonaka, 2010).

- Famille des Formicidae.

Les fourmis sont mangées sous toutes leurs formes. Elles peuvent être récoltées au stade adulte : ce sont par exemple les « fourmis à miel » du genre *Myrmecocystus* (Figure 20) que l'on retrouve dans les déserts notamment en Amérique du Nord, au Mexique et en Australie (Andersen, 1997 ; Hölldobler, 1981).

La fourmi à miel australienne ou *Melophorus bagoti* accumule du miellat dans son gastre afin de nourrir les autres membres de la colonie. Cette fourmi est considérée comme une friandise et est mangée crue par certains peuples, notamment les aborigènes (Louey Yen, 2010).



Figure 20 : Fourmi à miel (Louey Yen, 2010).

Certaines fourmis sont récoltées au stade larve et nymphes. C'est le cas d'*Oecophylla smaragdina*. Le mélange larve/nymphes (Figure 21) est nommé « Kroto » à Java. Bien que consommable par l'Homme, ce mélange est surtout utilisé pour nourrir les volailles.

Cette fourmi aurait un gastre riche en vitamine C et un goût légèrement acidulé (Césard, 2004).



Figure 21 : Panier de kroto avant le tri (Césard, 2004).

Au Mexique, les œufs de fourmi du genre *Liometopum* sont très prisés (Figure 22) et en font une espèce en danger. Ces œufs sont ramassés sur les racines d'*Agave tequilana* ou *Agave americana* et on les accommode en plat nommé escamole (Ramos-Elorduy, 2006).

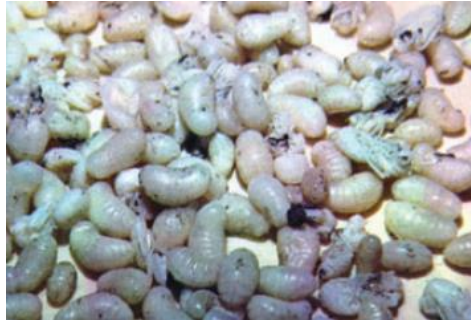


Figure 22 : Œufs de fourmi *Liometopum* formant l'escamole (Ramos-Elorduy, 2009).

2.3.3) L'ordre des Orthoptères.

Chez les orthoptères (criquets, grillons et sauterelles) ce sont les stades nymphe et adulte qui sont consommés. Pour consommer l'imago, il faut enlever toutes les parties dures du corps (tête, pattes, ailes, ...) avant de le cuisiner.

Les orthoptères les plus consommés sont *Acheta domesticus* et *Locusta migratoria* :

- *Acheta domesticus*.

Aussi appelé grillon domestique, *Acheta domesticus* est présent dans la plupart des régions du monde (présent en Afrique, Europe, une partie de l'Asie, Etats-Unis, ..). Il est catalogué comme insecte ravageur à cause de son régime alimentaire omnivore. L'imago est de couleur brun clair à marron et mesure 13 à 21 mm (Bellmann, 2006) (Figure 23).

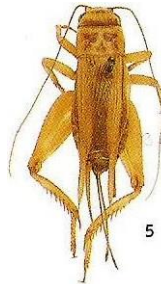


Figure 23 : *Acheta domesticus* (Leraut, 2003).

Il est aussi très utilisé en élevage, y compris dans les pays occidentaux où il sert de nourriture à d'autres espèces (reptiles, batraciens...).

- *Locusta migratoria*

Comme *Acheta domesticus*, ce criquet est présent en Asie, Europe, Afrique, Australie mais on ne le trouve pas du tout en Amérique du Nord et du Sud. C'est un insecte saisonnier qui apparaît l'été. Il est considéré comme nuisible. Il est herbivore et se nourrit de céréales, herbe

et feuilles. L'adulte mesure entre 35 et 50 mm et est de couleur verte à grise (Figure 24) (Leraut, 2003).



Figure 24: *Locusta migratoria* (Adalla et Cervancia, 2010).

Il est également très utilisé en élevage, comme *A. domesticus*. En effet, il a besoin de peu d'espace, possède un développement très rapide et est facile et peu onéreux à nourrir.

2.3.4) L'ordre des Lépidoptères.

Les lépidoptères (papillons) sont consommés au stade larvaire. La différence avec les autres ordres est qu'ici la larve est nommée « chenille ». Les chenilles sont consommées partout dans le monde avec de nombreuses espèces consommées en Afrique (notamment *Imbrasia oyemensis* présenté en Figure 25), en Amérique du Sud (notamment au Mexique avec l'espèce *Aegiale hesperiaris*) et en Asie (*Bombyx mori* et *Bombyx eri*).

- *Imbrasia oyemensis*.

Cette espèce se trouve surtout en République Centrafricaine, elle se nourrit des feuilles de l'arbre hôte *Entandrophragma cylindricum* (N'Gasse, 2003) aussi appelé Sapelli.



Figure 25: Chenilles *Imbrasia oyemensis* se nourrissant de feuilles de Sapelli, leur arbre hôte (N'Gasse, 2003).

- Les vers à soie *Bombyx mori* et *Bombyx eri*

Les vers à soie *Bombyx mori* et *Bombyx eri* sont les deux espèces les plus exploitées. Ces insectes sont employés dans la production de soie. Le ver à soie est le seul insecte à être

entièrement domestiqué par l'homme. S'il est élevé pour la soie, la pupe (Figure 26) peut être consommée (produit dérivé). Le ver à soie est surtout consommé en Asie (Thaïlande, Inde).



Figure 26: Pupa de *Samia ricini* (Sirimungkararat et al., 2010).

- *Aegiale hesperiaris*.

L'insecte est une mite qui pond ses œufs sur *Agave atrovirens*. La larve vit et se nourrit des feuilles de l'arbre hôte. Cette larve est considérée comme un plat traditionnel au Mexique. Ces larves parasites des différentes espèces d'agave (*Hypopta agavis*, *Xyleutes regtembacheri*) sont aussi utilisées pour agrémenter les bouteilles de mescal (Ramos-Elorduy, 2006).

2.3.5) L'ordre des Isoptères.

Les isoptères majoritairement consommés appartiennent à la famille des Termites (Figure 27). Ce sont des insectes à métamorphose incomplète, dont on consomme les nymphes et les adultes, que ce soient les ouvriers ou les termites ailées (Zaremski et al., 2009).



Figure 27 : Termite sexuée ailée *Reticulitermes lucifugus* (Bellmann, 2006).

Les termites sont la deuxième catégorie d'insecte la plus consommée après les orthoptères et sont parmi les espèces les plus nutritives.

2.3.6) L'ordre des Diptères.

Peu de diptères (mouches) sont consommés et ce sont les larves qui sont mangées. C'est souvent une entomophagie involontaire c'est-à-dire que les insectes sont ingérés avec leur

hôte (fruit ou légume). C'est le cas de *Anastrepha spp* (Onore, 1997), et autres mouches à fruits. Les larves de diptères sont également utilisées pour nourrir les volailles (Lokeshwari et Shantibala, 2010).

Musca domestica est une des seules espèces dont la larve (Figure 28) est consommée (Chen *et al*, 2009). Elle est surtout élevée pour son asticot qui sert à nourrir les élevages que ce soit sous forme d'insecte entier ou de farine.



Figure 28 : Larve de *Musca domestica* (Bellmann, 2006).

2.3.7) L'ordre des Odonatoptères.

Les libellules sont surtout consommées en Asie du Sud-Est (Bali, Thaïlande, Laos), où elles sont mangées sous forme d'adultes ou de larves (Figure 29), alors que quelques pays africains mangent juste les larves (notamment au Cameroun).



Figure 29 : Larve de *Sympetrum meridional* et *Lestes Macrostigma* (Jourde, 2010).

2.4) Valeurs nutritionnelles des insectes.

2.4.1) Les valeurs énergétiques et protéiques.

Depuis quelques années, de nombreuses études ont été menées pour déterminer si l'insecte pourrait ou non avoir sa place en nutrition humaine. L'utilisation d'insectes est tout à fait envisageable en tant qu'aliments humains. En effet, l'insecte est une source alimentaire assez complète car il contient de grandes quantités de protéines et d'énergie mais aussi de minéraux, de vitamines et de lipides (Tableau 11). Les termites sont riches en calcium surtout au niveau de l'abdomen (2300 µg / gramme de poids sec (Paoletti *et al.*, 2003)) alors que les sauterelles possèdent plus de fer et de zinc (Ramos-Elorduy, 1997). Les valeurs nutritionnelles des insectes varient énormément entre les différents ordres ainsi qu'entre les différentes espèces d'un même ordre. Ces différences s'expliquent par l'influence de facteurs tels que l'habitat, le régime alimentaire et le climat. Ces paramètres sont propres à chaque espèce.

Tableau 11 : Valeurs énergétiques et protéiques des principaux ordres d'insectes.

Insecte		Protéines (pourcentage pour 100 g de matière sèche).		Energie (kcal pour 100 g).		Référence
Ordre	Espèces	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	
Hyménoptères	<i>Apis mellifera</i> (larve) (pupe)		42 49		475 475	Ramos-Elorduy <i>et al.</i> , 1997.
	Moyenne des valeurs trouvées chez <i>V. basalis</i> , <i>V. mandarinia mandarinia</i> , <i>Polistes sagittarius</i> et <i>P. sulcatus</i> (larve)		53			Ying <i>et al.</i> , 2010.
	<i>Vespa singulata</i> (larve)				234	Bukkens, 1997.
	<i>Myrmecosistus melliger</i> (adulte)	5			401	Ramos-Elorduy <i>et al.</i> , 1997.
	<i>Oecophylla sp.</i> (adulte)		53			
	Œufs de fourmi « <i>Itlog langgam</i> »		17		128	Raksakantong <i>et al.</i> , 2010. Bukkens, 1997.
Orthoptères	<i>Blaberus sp.</i> Moyenne des valeurs trouvées chez <i>Melanoplus mexicanus</i> S., <i>Boopedon flaviventris</i> B. et <i>Sphenarium spp.</i> <i>Brachytrypes membranaceus</i> consommé cru. <i>Schistocerca sp.</i>	44	77	117	427	Ramos-Elorduy <i>et al.</i> , 2011. Ramos-Elorduy <i>et al.</i> , 2011. Bukkens, 1997.

						Ramos-Elorduy <i>et al.</i> , 1997.
Isoptères	<i>Macrotermes nigeriensis</i> (adulte) Termite soldat <i>Syntermes sp.</i> Termite ailée <i>Macrotermes subhyanlinus</i> (adulte)	21	64	306	613	Igwe <i>et al.</i> , 2011. Paoletti <i>et al.</i> , 2003. FAO et OMS, 2010. Lokeshwari et Shantibala, 2010.
Lépidoptères	<i>Phasus triangularis</i> (chenille) <i>Cirina Forda Westwood</i> (chenille) <i>Latebraria amphipyroides</i> (chenille)	15	74	293	762	Ramos-Elorduy <i>et al.</i> , 1997. Rumpold et Schlüter, 2013. Ramos-Elorduy <i>et al.</i> , 1997.
Coléoptères	<i>Oryctes boas</i> <i>Oryctes rhinoceros</i> <i>Rhyncophorus pheonicis</i>	26	42	285	425	Banjo <i>et al.</i> , 2006. Onyeike <i>et al.</i> , 2005. Onyeike <i>et al.</i> , 2005.
Diptères	<i>Copestylum haggi</i> <i>Chaoborus edulis</i>	37	49		460	Ramos-Elorduy <i>et al.</i> , 1997. Bukkens, 1997.
Hémiptères	<i>Umbonia reclinata</i> <i>Proarna sp.</i> <i>Corisella sp.</i> <i>Edessa sp.</i>	29	72	329	622	Ramos-Elorduy <i>et al.</i> , 1997. Ramos-Elorduy <i>et al.</i> , 1997. Ramos-Elorduy <i>et al.</i> , 1997. Ramos-Elorduy <i>et al.</i> , 1997.

Un insecte n'est pas uniquement une source de protéines mais apporte d'autres nutriments comme des lipides, des vitamines et des minéraux. Ainsi, l'abeille *Apis mellifera* fournit une quantité d'énergie de 475 Kcal / 100 g (Tableau 11), qui ne sont que partiellement expliqués par les 42 g de protéines (qui représentent seulement 168 Kcal). De plus, les larves sont beaucoup plus riches en nutriments que les adultes, ce qui s'explique par le fait que la larve fait des réserves pour se préparer au stade nymphal, qui est un stade de jeûne et d'immobilité. Le tableau 11 reflète ce constat avec la valeur énergétique la plus haute mise en évidence chez une chenille de lépidoptère *Phasus triangularis* qui peut amener jusqu'à 762 kcal pour 100 g (Ramos-Elorduy *et al.*, 1997). Il faut aussi remarquer la présence des termites (espèce hétérométabole) dans les espèces les plus nutritives : 613 Kcal pour 100 g de termites adultes.

Du point de vue des apports protéiques, être riche en protéines ne suffit pas, il faut également que celles-ci soient de haute qualité, ce qui est déterminé par la composition en acides aminés et par la digestibilité de ces protéines. Les insectes possèdent une quantité suffisante d'acides aminés pour couvrir les apports nutritionnels conseillés : la composition d'un insecte en acides aminés essentiels va de 46 à 96 % (Ramos-Elorduy *et al.*, 1997). La digestibilité des protéines d'insecte est assez bonne (77 à 98 %) (Ramos-Elorduy *et al.*, 1997). Ce chiffre est plus bas chez les insectes ayant un exosquelette : ceci est dû à la chitine. En effet, la chitine est une protéine non digestible par l'Homme qui ne dispose pas de chitinases digestives pour l'assimiler. Il convient donc de retirer les parties dures de ces insectes (tête, pattes, ailes ...) pour que l'insecte soit plus facilement digéré.

Les espèces les plus riches en protéines se trouvent dans l'ordre des orthoptères avec jusque 77,1% de protéines pour 100 g de matière sèche (Tableau 11).

2.4.2) Comparaison des apports protéiques et énergétiques des principaux animaux d'élevage et des insectes.

Le tableau 12 permet d'établir une comparaison entre les protéines et l'énergie apportées par les animaux d'élevage conventionnel et par les différentes sortes d'insectes.

Tableau 12 : Comparaison des apports protéiques et énergétiques entre animaux d'élevage et insectes (Sirimungkararat *et al.*, 2010 ; Srivastava *et al.*, 2009 ; ANSES (<http://www.afssa.fr/TableCIQUAL/index.htm>), 2012).

Animaux.	Protéines (g / 100 g de matière fraîche).	Energie (Kcal / 100 g)
Bœuf	19	150
Agneau	17	206
Veau	18	126
Porc	13	416
Poulet	21	110
Poisson	19	100
Œuf cru	13	145
Sauterelle (adulte)	17	124
Criquet (adulte)	15	125
Œuf de fourmi rouge	7	83
Termite (adulte)	14	613
Chenille	28	370
Charançon (larve)	7	562

Sur le plan des apports protéiques, parmi les espèces ordinairement élevées, c'est la viande blanche qui est la plus riche (le poulet apporte 21 g de protéines / 100 g), ensuite viennent la viande bovine (19 g / 100 g), et ovine (17 g / 100 g). Le porc est la viande qui apporte le moins de protéines (13 g / 100 g). Les autres élevages conventionnels apportent entre 100 et 206 Kcal / 100 g. En terme d'apports énergétiques, c'est la viande de porc qui est la plus riche avec 416 Kcal / 100 g (ce qui est normal car c'est la plus grasse). Les insectes, eux, sont très énergétiques. Les différents insectes et en particulier les larves peuvent apporter jusqu'à 28 g de protéines / 100 g, ce qui est largement supérieur aux espèces conventionnelles. Les orthoptères (criquets, grillons et sauterelles) sont riches en protéines et valent une viande

classique (Tableau 12). Les chenilles peuvent apporter jusqu'à 370 Kcal / 100 g et les larves de coléoptères jusqu'à 562 Kcal / 100 g. Les termites sont également très riches en énergie, avec 613 Kcal / 100 g, ce qui est 4 fois supérieur à la viande de bœuf.

Les insectes en tant qu'aliments sont également utilisés sous forme de farines pour nourrir les élevages d'espèces monogastriques (volailles et de porcs) ainsi qu'en pisciculture. Ces farines sont riches en protéines et sont équivalentes voire supérieures aux farines végétales, notamment la farine de soja (Rumpold et Schlüter, 2012). Pour 100 grammes de matière sèche, la farine d'insecte apporte 58,3% de protéines, comparé à la farine de soja qui n'en apporte que 46,8% (Wang *et al*, 2005 ; Anand *et al*, 2008). Hardouin et Mahoux (2003) ont testé durant un mois l'intérêt nutritionnel du ver de farine *Tenebrio molitor* sur deux lots de poissons d'aquarium en pleine croissance. Le premier groupe a été nourri avec des larves de vers de farine entières et le second avec un aliment à base de poisson séché. L'essai a montré un gain de poids supérieur chez le premier groupe sans signes d'effets néfastes sur la santé des animaux.

En résumé, l'insecte possède des qualités nutritionnelles comparables ou même parfois supérieures aux animaux d'élevage conventionnel. Ce constat s'ajoute à d'autres avantages qui sont exposés durant la troisième partie.

3) Troisième partie : l'élevage d'insectes

Ce chapitre présente tout d'abord les divers moyens utilisés pour récolter des insectes en milieu naturel, ainsi que les avantages et les inconvénients de ces procédés. Dans un second temps, je me suis intéressée à l'élevage d'insectes à travers plusieurs exemples d'élevages déjà pratiqués, en essayant d'établir les caractéristiques que doit présenter l'insecte d'élevage idéal. Enfin, j'ai comparé l'élevage d'insectes aux élevages classiques selon plusieurs critères tels que l'émission de gaz polluants, la consommation d'eau et de nourriture, et la place requise par de tels élevages.

3.1) Récolter des insectes en milieu naturel.

Quel que soit l'endroit du monde, les espèces d'insectes terrestres sont les plus consommées. Il n'existe que peu de cas de consommation d'insectes aquatiques : l'ordre des coléoptères ne contiendrait que 78 espèces aquatiques comestibles à l'échelle mondiale (Ramos-Elorduy *et al.*, 2009) contre 468 espèces terrestres actuellement recensées. De même, deux grands types d'insectes sont préférentiellement récoltés : les espèces holométaboles (dont les scarabées, les papillons, les abeilles, les fourmis) et paurométaboles (dont les grillons et les criquets). Ceci s'explique par le fait qu'on les trouve à des endroits déterminés et souvent en grandes quantités (un nid d'insectes sociaux contient un grand nombre d'individus) (Ramos *et al.*, 1997).

3.1.1) Les différents moyens de capture.

La très grande majorité des insectes est actuellement obtenue par récolte en milieu naturel. La quantité obtenue dépend en premier lieu du type d'insecte lui-même et de sa biologie : par exemple, le criquet s'attrape plus facilement le matin car cet insecte est inactif à basses températures (Van Huis, 2003). Certains insectes sont saisonniers (comme *Lymantria dispar* (Régnière, 2009), d'autres sont dépendants de la météo (certains insectes apparaissent à la fin de la saison des pluies). La disponibilité d'un insecte varie également en fonction de la disponibilité de son hôte (comme *Rhynchophorus ferrugineus* et son palmier hôte *Metroxylon sagu*).

- Méthode de récolte des guêpes et abeilles (Nonaka, 2010) :

Cette méthode est notamment utilisée au Japon où la population est très friande de ces insectes et où les guêpes construisent des nids souterrains. La guêpe ouvrière est attirée avec

un appât composé d'un morceau de viande auquel est attaché un ruban, comme le montre la figure 30. La guêpe attrape l'appât et le ramène au nid.

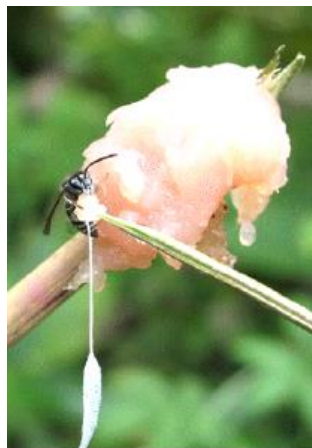


Figure 30 : Guêpe *Vespula flaviceps* transportant un appât (Nonaka, 2010).

Le but de cette technique est de permettre aux récolteurs de suivre l'insecte jusqu'au nid plus facilement car repérer la guêpe seule est très difficile. À noter que pour les espèces plus grosses (comme le frelon géant *Vespa mandarinia*), le ruban n'est pas nécessaire car l'insecte peut être repéré à l'œil nu. Une fois que la guêpe a conduit les récolteurs au nid, on enfume celui-ci. Cette manœuvre sert à séduire les guêpes adultes pour éviter qu'elles ne piquent. Le nid est ensuite déterré pour récupérer les larves et les pupes. Ce type de récolte n'étant pas sans risque, et il faut s'équiper de vêtements protecteurs.

- Méthode de récolte des criquets et sauterelles :

Ce sont des espèces poïkilothermes (i.e. animaux à sang froid) dont la température varie avec celle du milieu extérieur. Ces insectes se capturent donc tôt le matin, quand ils sont encore engourdis par les températures plus fraîches, et donc, moins réactifs.

Sphenarium purpurascens peut être cité comme exemple (Cerritos et Cano-Santana, 2008). Cette espèce de sauterelle aptère se rencontre au Mexique où elle est considérée comme nuisible car elle s'attaque aux cultures (blé, haricots, luzerne, ...). Cependant, les habitants de cette région en ont fait un complément nutritionnel de premier plan. Cette espèce se capture de Mai à Décembre. La récolte commence à l'aube et se fait à l'aide de filets. Cette technique permet de ramasser jusqu'à 70 kg d'insectes par semaine et par famille.

Le criquet taupe *Gryllotalpa longipennis* (Figure 31) se récolte également dans les champs cultivés.



Figure 31 : Criquet taupe *Gryllotalpa longipennis* (Adalla et Cervancia, 2010).

Cette espèce qui vit sous terre se nourrit de racines de pousses de riz. Cet insecte est récolté quand les rizières sont labourées avant semis (Chung, 2010).

- Méthode de récolte des chenilles :

Les chenilles se trouvent sur leur arbre hôte où elles se groupent sur le tronc (Figure 32). La présence de chenille est confirmée par les feuilles mangées et par des déjections accumulées au pied de l'arbre (N'Gasse, 2003).



Figure 32: Colonie d'*Imbrasia ertli* dans le tronc de *Funtumia* sp. (N'Gasse, 2003).

Pour récolter des chenilles, il suffit de les cueillir directement sur l'arbre à la main (attention aux chenilles qui présentent des poils urticants), ou les faire tomber en tapant sur le tronc de l'arbre.

La seconde méthode est de couper l'arbre puis de récolter les chenilles mais cette façon de faire n'est pas recommandée car elle contribue à la disparition de l'hôte et donc indirectement, à la diminution de l'espèce récoltée.

- Méthode de récolte des larves.

À la différence d'une chenille qui se nourrit de feuilles, une larve consomme la chair de l'arbre en putréfaction. Un arbre colonisé émet un bruit de crépitement caractéristique signe d'activité des larves (N'Gasse, 2003). Cette technique est très utilisée pour obtenir des larves de palmier (*Rhyncophorus* sp).

Prenons l'exemple du sagoutier *Metroxylon Sagu* : ce palmier est abattu afin d'en tirer du sagou qui est une fécule (Fraval, 2007). Les parties de l'arbre non utilisées sont laissées sur place. Pour récolter des larves de *Rhyncophorus ferrugineus*, il faut laisser pourrir l'arbre hôte pendant une période de 1 à 3 mois. Au bout de ce laps de temps, le tronc est fendu et il n'y a plus qu'à ramasser les larves se trouvant à l'intérieur. La récolte d'insectes est une utilisation dérivée de l'usage premier de cet arbre.

- Méthode de récolte de libellules (Césard, 2006) :

Comme dit précédemment dans la partie 2, les libellules sont surtout consommées en Asie (Bali, Thaïlande et Laos). Il y a plusieurs façons d'attraper ces insectes mais la plus répandue consiste à enduire une tige avec de la sève collante et d'engluier la libellule sur ce piège (Figure 33).



Figure 33: Libellule prisonnière d'un piège à glu (Césard, 2006).

On peut également utiliser une libellule de petite taille comme appât pour en attirer une plus grosse. Une fois attrapée, les ailes sont coupées et l'insecte est placé sur une tige de bois en attendant d'être cuisinée (Figure 34).



Figure 34 : Brochette de libellules (Césard, 2006).

- Méthode de récolte des termites

Il faut distinguer le piégeage des termites ouvrières, de celui des termites ailées sexuées. Piéger des termites ailées repose sur le fait que la plupart des insectes sont attirés par la lumière, il suffit donc de placer une lampe avec une bassine d'eau dessous ou à côté : l'insecte attiré par la lumière sera piégé dès qu'il se posera dans l'eau. Cette méthode fonctionne également pour les insectes volants nocturnes et pour capturer des éphéméroptères (Van Huis, 2003). Les insectes présentent une forte attirance pour les UV, en particulier les UV-A. Pour optimiser la capture, il est possible d'utiliser également des pièges à ultraviolets (Fohrer, 2008).

Concernant les termites ouvrières, il suffit de recouvrir l'orifice de sortie de la termitière avec un sac ou un récipient pour récolter des insectes (Vorsters *et al.*, 1994).

3.1.2) Avantages et inconvénients d'une récolte en milieu sauvage.

La récolte de spécimens en milieu sauvage demeure pour le moment la façon la plus fréquente de se procurer des insectes. Les populations qui récoltent les insectes le font en complément de leurs activités quotidiennes, puis les vendent aux marchés locaux ou à des grossistes, ce qui permet un revenu supplémentaire (un nid de guêpes se vend 100 dollars / kg au Japon) (Nonaka, 2010). Cette activité peut être pratiquée par tout le monde : femmes, enfants, personnes âgées,...

Récolter des insectes dans leur milieu naturel est aussi un moyen de lutter contre une trop forte utilisation de pesticides : l'espèce considérée comme nuisible est utilisée comme aliment, ce qui permet d'en diminuer sa prévalence, d'où un besoin moindre de pesticides.

Cette technique a porté ses fruits en Corée du Sud avec la sauterelle *Oxya velox* qui ravage les rizières. Dans les années 1960 à 1970, la forte utilisation de pesticides entraîna une diminution de consommation de cette espèce ainsi qu'une diminution du nombre de spécimens. À partir de 1981, les rizières étant beaucoup moins traitées chimiquement, la quantité de *Oxya velox* s'est mise à augmenter de nouveau, permettant aux paysans de récolter cet insecte en labourant puis de le vendre sur les marchés comme aliment (DeFoliart, 1997).

Enfin, le fait de considérer l'insecte comme une ressource d'intérêt permet indirectement de sauvegarder son environnement et ainsi de protéger la biodiversité. Cependant, la récolte d'insectes ne possède pas que des points positifs : en effet, ramasser des spécimens, même en pleine nature, n'empêche pas ceux-ci de s'être contaminés, que ce soit avec des pesticides (si l'insecte s'est par exemple nourri avec une plante traitée) ou avec une substance propre à la plante ingérée (Yen, 2009). L'insecte peut être également contaminé

avec des champignons ou des bactéries. Ainsi, la larve de *Bunaea alcinoe* (Lépidoptère trouvé au Niger) est contaminée avec des bactéries produisant des entéro-toxines qui sont cependant détruites par la cuisson (Amadi *et al.*, 2005).

L'approvisionnement en insectes est souvent dépendant des saisons et des conditions météorologiques. De même, lors de la pleine saison, le fait de récolter une espèce en masse, et de ne pas sélectionner les stades prélevés, empêche cette espèce de se renouveler correctement, ce qui conduit à sa disparition et à son extinction progressive : la récolte en milieu sauvage peut donc nuire à la biodiversité.

Certains moyens de récolte sont très agressifs pour l'environnement : le fait d'abattre les arbres pour récolter des chenilles ou des larves ou le fait de faire des feux sans contrôle provoquent la destruction des espèces hôtes et participent indirectement à la raréfaction de certaines espèces (Schabel, 2010).

3.2) L'élevage d'insectes

3.2.1) Définition d'un mini-élevage.

Le mini-élevage (c'est à dire d'espèces de petite taille) est une notion qui a été introduite en 1984 par Noël Vietmeyer, puis en 1991 dans un ouvrage intitulé « *Microlivestock : little-known small animals with a promising economic future* » (National Academic Press, USA).

Le but de cet élevage est d'exploiter des espèces de petite taille, déjà utilisées par l'Homme par les récoltes ou le braconnage, afin d'aboutir à une production contrôlée et régulière.

Cette production sert en nutrition humaine, pour supplémenter l'alimentation des espèces monogastriques et / ou pour assurer des revenus supplémentaires aux éleveurs si la production est excédentaire (Hardouin, 1995).

Le mini-élevage se pratique dans des régions où élever des espèces conventionnelles à grande échelle représenterait un coût trop important et aurait un impact négatif sur la biodiversité locale (Cerda *et al.*, 2001).

Une condition indispensable à ce type d'élevage est de connaître totalement la biologie de l'espèce à produire afin d'optimiser et d'agir sur toutes les étapes du cycle de développement.

Le mini-élevage se pratique surtout dans les campagnes et on compte actuellement en grande majorité des espèces tropicales.

Les types d'animaux utilisés peuvent être (i) vertébrés : l'aulacode *Thryonomys* sp., le cobaye *Cavia porcellus*, les grenouilles, et (ii) invertébrés : escargots géants d'Afrique, *Achatina* sp., ver de terre *Perionyx excavatus*.

3.2.2) Les différents degrés d'élevage d'insectes.

Il existe plusieurs types d'élevages d'insectes qu'il est possible de distinguer en élevages *in situ* et *ex situ*. L'élevage *in situ* s'effectue dans l'habitat naturel de l'insecte alors que l'élevage *ex situ* consiste à se procurer un insecte et à l'élever dans des conditions différentes de son évolution naturelle. L'élevage sur place permet de subvenir aux besoins d'un petit nombre de gens, alors que l'élevage *ex situ* permet une production à grande échelle, plus intensive, de manière totalement contrôlée.

De même, il existe plusieurs degrés dans un élevage : l'insecte peut être totalement domestiqué, semi-domestique (il vit en semi-captivité), ou même sauvage (Schabel, 2010).

- Cas d'élevage d'insecte sauvage : exemple de *Vespula* spp.

Ce type d'élevage est pratiqué majoritairement au Japon, où les guêpes sont très prisées comme mentionné dans la partie 2. Si un récolteur trouve un nid contenant une colonie assez jeune (la reine, de nombreux œufs et larves et quelques ouvrières), il se l'approprie et le ramène à proximité de son habitation. Il faut construire un abri à la ruche (Figure 35), qui doit être protégé des intempéries et du soleil trop puissant.



Figure 35 : Un abri contenant un nid de *Vespula* spp (Nonaka, 2010).

L'éleveur nourrit la colonie avec des restes de viande et de l'eau sucrée (Nonaka, 2010). Les guêpes ne sont pas captives mais la qualité de l'abri et de la nourriture fait qu'elles continueront de nicher à cet endroit. S'occuper de cet élevage nécessite cependant plus de matériel et de protections que dans le cas d'autres espèces.

- La semi-captivité.

Cette technique consiste à implanter, dans des arbres sélectionnés, des insectes à des stades juvéniles (larves ou œufs). Cette manière de procéder implique une bonne connaissance de l'insecte et de sa biologie, en effet, il faut connaître l'arbre hôte de l'espèce. Pour la semi-captivité, mieux vaut privilégier des espèces sans ailes qui restent à proximité de l'arbre hôte pour pondre leurs œufs, ou des formes assez statiques, comme les chenilles.

Ainsi en Chine, des zones sont entièrement plantées avec du chêne chinois (*Quercus variabilis*), juste pour pouvoir élever *Antheraea pernyi*, papillon de la famille des lépidoptères aussi appelé Bombyx chinois. La figure 36 le représente sous sa forme adulte ainsi qu'à l'état de chenille (Schabel, 2010).



Figure 36: *Antheraea pernyi* adulte et au stade de chenille (OPIE, 2013).

Cet insecte produit de la soie et sert également de nourriture. Ces chênaies n'ont été plantées que dans ce seul but : c'est une technique de piégeage d'insecte. Cette méthode est également utilisée dans une ferme à Yuyao (province de Zhejiang, Chine) pour élever des fourmis tisserandes *Oecophylla smaragdina* (Chen et Akre, 1994).

On peut également citer le cas de *Anaphe panda* (lépidoptère) et son arbre hôte *Bridelia micrantha* (Mbahin *et al.*, 2012).

- La domestication.

Un insecte domestique est une espèce vivant en captivité totale. Il a été totalement extrait de son milieu d'origine et est élevé en cage. Il ne se nourrit plus lui-même et dépend totalement de l'Homme. Un insecte est domestiqué quand il lui est impossible de survivre en milieu sauvage. Les espèces les plus anciennement domestiquées sont les vers à soie *Bombyx mori* et *Samia riciini*. Ces deux espèces sont utilisées pour la soie qu'elles produisent, mais aussi comme ressource alimentaire. Ce sont les deux seules espèces totalement domestiques connues à ce jour.

Cependant une étude préliminaire a été réalisée en 2000 par Munyuli sur la faisabilité de domestication de la chenille *Anaphe infracta* : les résultats étaient positifs.

3.2.3) Exemples d'élevages d'insectes.

Une espèce d'insecte doit remplir plusieurs conditions pour être considérée comme présentant un intérêt pour être élevée (Ramos-Elorduy, 2009).

- L'insecte doit être parfaitement connu sur le plan physiologique et biologique. Le cycle de développement de l'espèce choisie doit être maîtrisé afin d'optimiser les différents paramètres agissant notamment sur la vitesse de croissance des divers stades.
- L'insecte doit évidemment présenter un intérêt nutritionnel avec une forte teneur protéique et/ou énergétique.
- L'espèce est également sélectionnée en fonction de sa capacité à transformer sa nourriture en biomasse (Offenberg, 2011). C'est l'efficacité de conversion de nourriture ingérée (ECI). Cette notion est valable pour tous les animaux : quand un animal se nourrit, la proportion de nourriture ingérée qui est digérée permet de déterminer l'efficacité d'assimilation (AD ou « approximate digestibility »). En effet, sur la totalité des nutriments absorbés, une partie est utilisée pour le métabolisme et la respiration, le reste est transformé en biomasse animale nette, et exprimé comme l'efficacité de conversion des aliments digérés (ECD). L'efficacité de conversion de nourriture ingérée s'écrit $ECI = ECD \times AD$ (Lindroth, 1993).
- L'insecte doit être capable de produire un grand nombre de générations par an et avoir un bon taux de reproduction.
- Il faut également que l'espèce choisie puisse se développer dans un espace réduit sans que l'efficacité de sa capacité de conversion en pâtisse (chez le ver à soie *Bombyx mori*, l'efficacité de conversion ne dépend pas de l'espace mais de la quantité de nourriture à disposition) (Yang *et al.*, 2009).
- L'élevage doit pouvoir se faire dans de très petites surfaces, en exploitant même la verticalité, c'est-à-dire en empilant les boîtes contenant les insectes. L'élevage peut être mis en place en utilisant des structures et des matériaux disponibles sur place.
- Enfin, il faut choisir des espèces capables de recycler des ressources, ce qui signifie que l'insecte est nourri avec des aliments « usagés » comme des déchets de table ou des sous-produits d'autres récoltes... tout ce qui n'est pas consommable directement par l'Homme.

Les élevages actuellement les plus pratiqués concernent des orthoptères, des larves de lépidoptères, de coléoptères et de diptères. Trois exemples d'élevage sont décrits ci-dessous : vers de farine *Tenebrio molitor*, grillons domestiques *Acheta domesticus* et mouches domestiques *Musca domestica*.

3.2.3.1) Elevage de vers de farine (larves de *Tenebrio molitor*).

Pour élever des vers de farine, il faut disposer de vivariums d'environ 20 cm de long : il suffit d'utiliser des boîtes en plastique ou en verre (Figure 37). Il est important d'utiliser des contenants à la paroi lisse, pour empêcher l'insecte de grimper.



Figure 37 : Vivarium à *Tenebrio molitor* (OPIE, 2013).

Il faut ensuite préparer le mélange nutritif où les larves vont se développer. Toutes les farines sont acceptables mais Hardouin et Mahoux (2003) préconisent le mélange suivant : 2 kg de farine, 200 g de son, 200 g de levure de bière en poudre et 200 g de carottes râpées pour nourrir une centaine d'insectes. Il est également possible de compléter ce milieu avec des fruits ou des légumes. Les aliments doivent être le moins possible contaminés par des pesticides sinon les larves le seront à leur tour. La présence de carnitine est également indispensable car c'est un facteur de croissance pour cette espèce.

Les larves sont placées dans le mélange et il faut recouvrir ce milieu de papier humide. Le taux d'humidité joue un rôle important dans l'optimisation de l'élevage. Il doit être d'environ 70%. Même si *Tenebrio molitor* a la capacité de survivre avec des quantités d'eau très limitées (il extrait l'eau atmosphérique, celle des aliments et celle de ses excréments), un taux d'humidité élevé permet d'augmenter la productivité en jouant sur la fécondité, le taux de reproduction (avec uniquement de la nourriture sèche, production de 1 génération par an contre 6 générations par an avec de l'eau à disposition) et l'activité (l'insecte adulte est plus actif si il dispose d'eau).

La température optimale de l'élevage doit être constante à 27° (c'est à cette température que le stade nymphal sera le plus court). En effet les larves passent par de nombreux stades de développement avant de démarrer la nymphose. Il faut isoler les nymphes pour éviter qu'elles ne se fassent manger par les larves. La durée moyenne d'un cycle de développement de l'œuf à l'adulte est d'environ 4 mois (les conditions de température et d'humidité citées plus haut sont des facteurs déterminants). Un adulte vit environ 3 mois et une femelle de *Tenebrio molitor* peut pondre jusqu'à 280 œufs durant sa vie.

3.2.3.2) Elevage de grillons *Acheta domesticus*.

Comme pour le ver de farine, le vivarium est une caisse mais il faut choisir un matériau lisse et sans interstices (pour éviter que les criquets nouvellement éclos qui sont très petits ne sortent (Hardouin et Mahoux, 2003) (Figure 38).



Figure 38 : Vivarium à grillons (OPIE, 2013).

L'avantage du grillon est que cette espèce est omnivore, c'est-à-dire qu'il est possible de le nourrir avec les restes de repas (épluchures, restes de viande, ...). Le vivarium contient un coton imbibé d'eau pour que le grillon puisse boire, la nourriture, des contenants type boîtes à œufs en carton qui serviront d'abri. Il faut aussi prévoir une zone de terre humide qui servira de pondoir. La terre sera couverte de tissu avec des mailles assez fines : le but est de préserver les œufs de la voracité des adultes une fois que les femelles ont pondu.

Le grillon peut se développer jusqu'à une température de 20°C, cependant, la température optimale avoisine les 30°C. Une étude pratiquée par Booth et Kiddell (2007) a mis en évidence que *A. domesticus* élevé à une température de 28°C arrive à maturation au bout de 49 jours, alors qu'il faudrait 119 jours pour amener ce même grillon à maturation sous une température de 25°C.

L'œuf met une quinzaine de jours à éclore, puis il faut 2 à 3 mois pour transformer un jeune en adulte. L'imago vivra environ 3 mois pendant lesquels une femelle peut pondre des milliers d'œufs. *Acheta domesticus* est doté d'un très bon taux de reproduction, avec la production d'une génération par mois. Un vivarium d'un mètre carré permet d'élever 2000 grillons en l'espace de quelques mois. Une fois que l'habitat est trop saturé en individus, une autorégulation s'opère car il y a compétition pour la nourriture et le surplus de population meurt et est mangé par les autres. Un élevage de grillon est donc très productif.

Pour prélever des individus, il suffit de récolter les boîtes à œufs où les insectes se réfugient.

3.2.3.3) Elevage d'asticots de *Musca domestica*.

Pour l'élevage de *Musca domestica*, il faut disposer d'une série de récipients qui abriteront les différents stades de développement de l'insecte.

Le substrat pour la ponte et le développement des larves peut être constitué de nombreuses sortes de déchets organiques (Hardouin *et al.*, 2000). La nourriture se compose de déchets de cuisine, de boulettes de viande... Ce milieu doit être humide. La mouche pond ses œufs sur ce substrat. Ceux-ci sont sensibles au taux d'humidité ambiant (optimal de 40 à 70 % (Lubac, 2006) et à la température (plus la température est élevée, plus l'œuf éclot rapidement), qu'il faut maintenir une température d'environ 26 ° (Blanchot, 1991). On recouvre ensuite le substrat avec de la sciure pour assécher le milieu, puis le récipient est recouvert avec un tulle à mailage fin pour éviter la fuite des larves.

La larve (ou asticot) passe par 3 stades de développement, il faut récolter les asticots au troisième stade, juste avant la transformation en pupe, qui ne possède pas d'intérêt nutritionnel. Le dernier stade est caractérisé par une migration des larves vers le milieu le plus sec (Blanchot, 1991). Il est nécessaire de laisser quelques larves finir le cycle de développement afin d'assurer la continuité de l'élevage.

Musca domestica se caractérise par un très fort taux de reproduction : une femelle peut pondre, dans des conditions optimales, jusqu'à 2000 œufs en une vie qui dure de 15 à 90 jours (Hardouin et Mahoux, 2003 ; Lubac, 2006). Un élevage peut produire jusqu'à 26 générations par an (Mitsuhashi, 2010).

3.4) Comparaison entre un élevage traditionnel et un élevage d'insecte.

Les deux types d'élevages peuvent être comparés sur plusieurs plans : place occupée, consommation d'eau douce, pollution engendrée, coûts de production.

La première comparaison que l'on peut effectuer est l'espace nécessaire pour la production : les études menées montrent que l'élevage d'un insecte prend très peu de place. Ainsi, un contenant de 50 x 44 x 20,5 cm permet d'élever jusqu'à 6000 criquets *Acheta domesticus* (Parajulee *et al.*, 1993). Pour les espèces conventionnelles, plus l'animal est gros, plus l'espace nécessaire est vaste. La figure 39 montre que produire 1 kg de protéines de bœuf prend 144 à 258 m², 1 kg de protéines de volaille prend 44 à 52 m², 1 kg de protéines de porc nécessite 47 à 64 m² (De Vries et De Boer, 2009). Par comparaison, produire 1 kg de protéines de *Tenebrio molitor* nécessite 18 m² dont 99 % sont utilisés pour cultiver la nourriture des vers. Produire des insectes permet donc un gain de place certain comparé aux autres élevages : produire 1 kg de bœuf prend jusqu'à 14 fois plus de place.

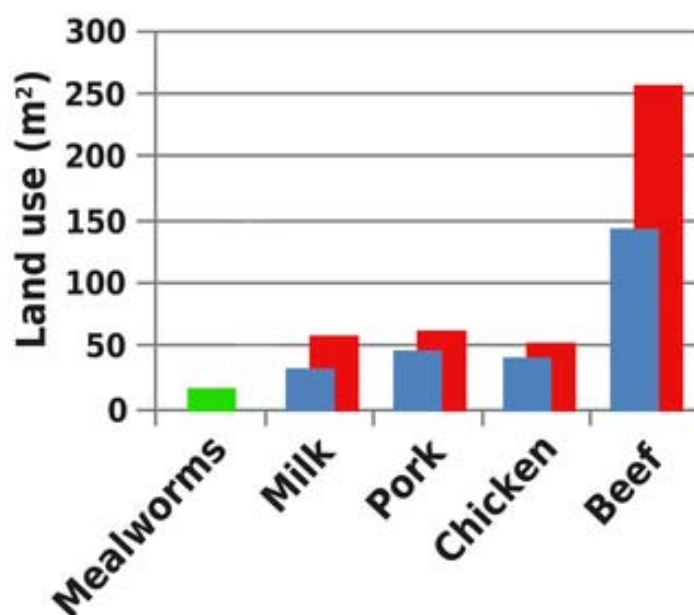


Figure 39 : Espace nécessaire pour produire 1 kg de protéines consommables par l'Homme (Oonincx et de Boer, 2012).

Le coût d'un élevage est un autre paramètre clé. Les coûts de production d'un élevage sont multiples et regroupent divers facteurs tels que l'achat de nourriture pour les animaux, les frais d'élevage, l'acquisition des bâtiments, la rémunération des employés, la mécanisation de l'élevage, ...

Concernant les coûts de production des élevages d'insectes, il est actuellement difficile de les estimer car la production n'est, pour le moment, pas automatisée et tout le travail s'effectue manuellement, ce qui augmente les coûts de production, rendant l'insecte plus cher que la viande classique (Rumpold et Schlüter, 2013). La société Micronutris, entreprise créée en 2011 dans le Midi-Pyrénées, produit notamment des grillons et des vers de farine : un sachet de grillons coûte 12,50 € / 40 grillons déshydratés et un sachet de vers de farine coûte 12,50 € / 160 vers déshydratés. Il est alors indispensable, pour diminuer les coûts de production, de développer des techniques de production industrielles qui incluraient des contrôles des différentes phases de production.

Les insectes sont également beaucoup moins polluants que les espèces conventionnelles. Par rapport à la production mondiale, l'élevage est responsable de 9 % des émissions de CO₂, 35 à 40 % des émissions de CH₄, 65 % des émissions de NO₂ et 63 % des émissions de NH₃ (Steinfeld *et al.*, 2006). Oonincx *et al.* (2010) ont comparé les émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac de 5 insectes (*Acheta domesticus*, *Locusta migratoria*, *Tenebrio molitor*, adulte de *Blaptica Dubia* de l'ordre des blattoptères et larve de *Pachnoda marginata*, coléoptère) avec celles émises par les porcs et les bovins. Les insectes produisent moins de CO₂ par kg de gain de poids (*Tenebrio molitor* produit 1,031 g / kg / jour, alors qu'un porc en produit 865 g / kg / jour). Les émissions d'ammoniac des insectes étudiés sont elles aussi inférieures à celles des bovins (pour exemple, *Acheta domesticus* produit 142 mg NH₃ / kg de gain de poids / jour, *Locusta migratoria* produit 36 mg / kg / jour, alors qu'un porc produit jusqu'à 1920 mg de NH₃ / kg / jour). Tous les insectes ne produisent pas de méthane, c'est uniquement une caractéristique des blattoptères, des isoptères, et des cetonidæ, famille de coléoptères (Hackstein et Stumm, 1994). La production de méthane est comparable voire supérieure à celle du porc mais environ 20 fois inférieure à celle des bovins (*Blaptica dubia* émet 1,4 mg CH₄ / kg masse gagnée / jour contre 114 mg / kg / jour pour les bovins). Les émissions de protoxyde d'azote sont également inférieures chez les insectes. L'élevage d'insectes apparaît donc comme moins polluant que l'élevage conventionnel. Il faut cependant choisir des espèces dont tous les stades de vie présentent de faibles émissions de gaz à effet de serre.

Pour comparer deux types d'élevage, il est également possible d'étudier l'empreinte en eau des différentes espèces, ainsi que leur ECI (efficacité de conversion de la nourriture ingérée). L'empreinte en eau est un indicateur applicable à tous les domaines. Il permet de mesurer le volume d'eau douce requis pour une production. À titre d'exemple, il faut 15400 litres d'eau douce pour produire 1 kg de bœuf, 6000 litres pour 1 kg de porc (Mekonnen et Hoekstra, 2010). Si on rapporte ces chiffres à l'efficacité de conversion de la nourriture ingérée par espèces, il apparaît que les espèces classiques consomment beaucoup plus qu'elles ne fournissent de biomasse disponible : il faut environ 8 kg de nourriture pour produire 1 kg de bœuf, 4 kg d'aliments pour 1 kg de porc (Rumpold et Schlüter, 2013). Les insectes en revanche possèdent une grande capacité de conversion : la production de 1 kg de criquet ne nécessite que 1,7 kg de nourriture consommée. Cette différence d'ECI s'explique en partie par le fait que l'insecte est un animal à sang froid, il dépense donc beaucoup moins d'énergie pour maintenir sa température et assurer son métabolisme.

Enfin, les insectes ont un taux de reproduction bien supérieur aux espèces d'élevage classique, ainsi qu'un plus grand nombre de générations par an (une femelle de *Musca domestica* peut pondre jusqu'à 2000 œufs dans sa vie, et la production peut atteindre jusque 26 générations par an (Mitsuhashi, 2010). Le rendement d'un élevage d'insecte est donc supérieur à celui d'un élevage classique.

En conclusion, l'élevage d'insecte présente des avantages indéniables par rapport aux autres espèces, la seule difficulté reste la mécanisation des structures afin d'obtenir les coûts de production les plus bas, ce qui permettrait de banaliser l'utilisation d'insectes dans l'industrie alimentaire.

3.5) Accommoder et conserver les insectes.

En règle générale, l'insecte subit une préparation avant d'être consommé : peu sont mangés crus. Les espèces qui disposent d'une enveloppe rigide (ce sont les insectes hétérométaboles et les formes adultes des holométaboles) sont d'abord débarrassées de toutes les parties dures : ailes, pattes, tête. Les chenilles et les larves doivent être vidées et rincées avant d'être accommodées (Yhoung-Aree *et al*, 2010). Certaines chenilles présentent également des poils qui peuvent être urticants, il est donc nécessaire d'en débarrasser l'insecte en le passant à la flamme.

Les méthodes d'accommodation sont nombreuses : la plupart du temps l'insecte est rôti (à l'exception des guêpes et abeilles). Il peut également être fumé, cependant cette méthode présente un risque pour la santé du consommateur à cause des émanations toxiques contenues dans la fumée utilisée. Les larves de coléoptères sont généralement frites dans l'huile. L'insecte peut également être bouilli (Van Huis, 2003).

Pour la conservation, la méthode la plus répandue est de cuire l'insecte puis de le laisser sécher durant plusieurs jours, ce qui lui assure plusieurs mois de conservation.

Voici un exemple de recette philippine appelée Adobong camaru. Elle est préparée avec un orthoptère, le grillon-taupe, *Gryllotalpa* sp. (Adalla et Cervancia, 2010).



Figure 40 : Un plat d'Adobong camaru ((Adalla et Cervancia, 2010)

- Préparer les insectes : retirer les parties dures (tête, pattes et ailes), puis laver et égoutter les grillons.
- Faire chauffer de l'huile dans une casserole et faire revenir les insectes avec de l'ail et de l'oignon.
- Ajouter de la sauce soja, du vinaigre de sucre de canne et un piment émincé.
- Couvrir et laisser cuire à feu doux 5 à 8 minutes.

Conclusion

L'insecte est un animal appartenant à l'embranchement des arthropodes. Avec 1 million d'espèces décrites à ce jour et plus d'une trentaine d'ordres, il représente une grande partie des espèces animales connues. Parmi cette variété d'insectes, toutes ne sont pas utilisables en tant qu'aliments : Jongema (*in* Rumpold et Schlüter, 2012) a recensé environ 2000 espèces consommées dans plus de 113 pays, que cette consommation soit ponctuelle ou régulière.

L'insecte est encore, la plupart du temps, récolté dans son habitat naturel pour une consommation immédiate ou pour être vendu sur les marchés locaux.

La situation démographique et nutritionnelle actuelle et son évolution prévisible dans les années à venir a poussé les instances mondiales à rechercher des solutions alternatives moins coûteuses et moins polluantes pour parvenir à nourrir les populations qui ne disposent pas des ressources suffisantes pour satisfaire leurs besoins énergétiques et protéiques. Ainsi, l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) promeut depuis plusieurs années l'utilisation d'insectes à des fins de nutrition humaine. Elle a réaffirmé lors de la « Conférence internationale sur les forêts au service de la sécurité alimentaire et de la nutrition » (Rome, mai 2013) son désir d'exploiter les produits forestiers, dont les insectes, dans la lutte contre la malnutrition. En effet, l'insecte est une ressource présentant un fort intérêt nutritionnel, égalant voire même surclassant les espèces traditionnelles en terme de protéines et d'énergie : certains criquets peuvent être composés jusqu'à 77 % de protéines (Ramos-Elorduy *et al.*, 2011), la chenille *Cirina Forda Westwood* peut contenir jusqu'à 74 % de protéines (Rumpold et Schlüter, 2013) et la chenille de *Phasus triangularis* peut fournir jusqu'à 762 Kcal / 100 g (Ramos-Elorduy *et al.*, 1997).

Outre son potentiel nutritif avéré, l'insecte présente également de nombreux avantages en termes d'élevage. Celui-ci est possible à plus ou moins grande échelle dans des zones où les autres types d'élevage sont trop difficiles ou coûteux à mettre en place. Même une petite structure permet d'élever des centaines d'individus. L'élevage d'insecte ne requiert que peu d'espace, consomme peu d'eau et de nourriture, et montre des taux de reproduction très élevés avec un grand nombre de générations produites par an. Des études montrent également que l'élevage d'insecte émet moins de gaz à effet de serre.

Certaines entreprises se sont déjà lancées dans la production d'insectes comestibles, sous forme entière ou de farines, cependant ces produits seront majoritairement destinés aux pays en développement, là où la famine persiste. En effet, les habitudes sociales et culturelles

des pays occidentaux engendrent des préjugés assez forts vis-à-vis de cette forme de nourriture, et les seuls fournisseurs dans ces zones restent quelques restaurants.

De plus, la production d'insectes à des fins alimentaires pourrait bien concerner d'autres domaines. En effet, certaines études sont menées, notamment par des scientifiques japonais (Mitsuhashi, 2010), afin de produire des cellules d'insectes pour fournir de la nourriture lors de voyages dans l'espace.

Références bibliographiques

- Adalla, CB., Cervancia, CR.** 2010. Philippine edible insects: a new opportunity to bridge the protein gap of resource-poor families and to manage pests. *Edible forest insects, Human bites back*. 151-160. <http://www.fao.org/docrep/012/i1380e/i1380e00.pdf> consulté le 19/03/2013.
- Aguilar-Miranda, ED., Lopez, M., Escamilla-Santana, C., Barba de la Rosa.** 2002. Characteristics of maize flour tortilla supplemented with ground *Tenebrio molitor* larvae. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 50. 192-195.
- Albouy, V.** 2011. *Bien débiter en entomologie*. Editions Glénat. 63p.
- Amadi, EN., Ogbalu, OK., Barimalaa, IS., Pius, M.** 2005. Microbiology and nutritional composition of an edible larva (*Bunaea alcinoe* stoll) of the Niger delta. *Journal of Food Safety* 25. 193-197.
- ANAES,** 2003. Évaluation diagnostique de la dénutrition protéino-énergétique des adultes hospitalisés. http://www.has-sante.fr/portail/upload/docs/application/pdf/denuitration_recos_2006_09_25_14_20_46_375.pdf consulté le 03/12/2012.
- Anand, H., Ganguly, A., Haldar, P.** 2008. Potential value of acridids as high protein supplement for poultry feed. *International Journal of Poultry Science* 7. 722-725. Asian Network for Scientific Information.
- Andersen, AN.** 1997. Functional groups and patterns of organization of North American ant communities: a comparison with Australia. *Journal of Biogeography* 24. 433-460. Blackwell Science Ltd.
- Apfelbaum, M., Forrat, C. & Nillus, P.** 1995. *Diététique et nutrition*. Elsevier Masson 7^e édition. 516p.
- Ashworth, A., Khanum, S., Jackson, A., Schofield, C.** 2004. Directives pour le traitement hospitalier des enfants sévèrement dénutris. OMS. 52p. http://www.who.int/nutrition/publications/guide_inpatient_fra.pdf consulté le 30/11/2012.
- Attané, I., Barbieri, M.** 2009. La démographie de l'Asie de l'Est et du Sud-Est des années 1950 aux années 2000. *Populations* 64. 7-154.
- Banjo, AD., Lawal, OA., Songonuga, EA.** 2006. The nutritional value of fourteen species of edible insects in southwestern Nigeria. *African Journal of Biotechnology* 5. 298-301. Academic Journals.
- Bedford, GO.** 1976. Observations on the biology and ecology of *Oryctes Rhinoceros* and *Scapanes Australis* (Coleoptera: Scarabaeidae Dynastinae): pests of coconut palms in Melanesia. *Australian Journal of Entomology* 15. 241-251.
- Bellmann, H.** 2006. *Insectes et principaux arachnides*. Editions Vigot. 440p.
- Beverley, C., Ponsonby, D.** 2006. *Les insectes*. Editions Marabout. 288p.
- Blanchot, P.** 1991. Elevage de la mouche domestique (*Musca domestica*). <http://www.philippeblanchot.com/publications/Elevage%20de%20la%20mouche%20domestique.%20Musca%20domestica.pdf> consulté le 03/07/2013.
- Booth, DT., Kiddell, K.** 2007. Temperature and energetics of development in the house cricket (*Acheta domestica*). *Journal of Insect Physiology* 53. 950-953.
- Boulidam, S.** 2010. Edible insects in a Lao market economy. *Edible forest insects, Human bites back*. 131-141. <http://www.fao.org/docrep/012/i1380e/i1380e00.pdf>
- Briend, A.** 1998. La malnutrition de l'enfant : Des bases physiopathologiques à la prise en charge sur le terrain. Institut Danone. p.22-23. <http://www.danoneinstitut.be/files/pdf/chairs/monographies/mono6.pdf> consulté le 23/11/2012.
- Bukkens, S.** 1997. The nutritional value of edible insects. *Ecology of Food and Nutrition* 36. 287-319. Overseas Publishers Association.
- Cerda, H., Martinez, R., Briceno, N., Pizzoferrato, L., Manzi, P., Tommaseo Ponzetta, M., Marin, O., Paoletti, MG.** 2001. Palm worm: (*Rhynchophorus palmarum*) traditional food in Amazonas, Venezuela nutritional composition, small scale production and tourist palatability. *Ecology of Food and Nutrition* 40. 13-32.
- Cerritos, R., Cano-Santana, Z.** 2008. Harvesting grasshoppers *Sphenarium purpurascens* in Mexico for human consumption: a comparison with insecticidal control for managing pest outbreaks. *Crop Protection* 27. 473-480.
- Césard, N.** 2004. À la recherche du kroto : la collecte commerciale des fourmis tisserandes en Indonésie. *Insectes* 132. 3-6.
- Césard, N.** 2004. Le kroto (*Oecophylla smaragdina*) dans la région de Malingping, Java-Ouest, Indonésie : collecte et commercialisation d'une ressource animale non négligeable. *Anthropozoologica* 39.
- Césard, N.** 2006. Des libellules dans l'assiette : les insectes consommés à Bali. *Insectes* 140. 3-6.
- Chen, Y., Akre, RD.** 1994. Ants used as food and medicine in China. *The Food Insects Newsletter* 7. 8-10.
- Chen, X., Feng, Y., Chen, Z.** 2009. Common edible insects and their utilization in China. *Entomological Research* 39. 299-303. The Entomological Society of Korea and Blackwell Publishing Asia Pty Ltd.
- Chinery, M.** 2005. *Insectes de France et d'Europe occidentale*. Editions Flammarion. 320p.

- Chung, AYC.** 2010. Edible insects and entomophagy in Borneo. *Edible forest insects, Human bites back*. 141-149. <http://www.fao.org/docrep/012/i1380e/i1380e00.pdf> consulté le 17/03/2013.
- DeFoliart, G.** 1997. An overview of the role of edible insects in preserving biodiversity. *Ecology of Food and Nutrition* 36. 109 - 132. Overseas Publishers Association.
- DeFoliart, G.** 2003. Insects as food. *Encyclopedia of Insect*. 431-436. Resh, VH et Cardé, RT, Academic Press.
- De Vries, M., De Boer, IJM.** 2009. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life. *Livestock Science* 128. 1-11.
- Dupire, J.** 1998. *Objectif malnutrition*. Editions Similia. 187p.
- Dykstra, DP., Heinrich, R.** 1996. Code modèle FAO des pratiques d'exploitation forestière. <http://www.fao.org/docrep/V6530F/v6530f00.htm#Contents> consulté le 29/08/2013.
- EPPO**, 2007. *Rhynchophorus ferrugineus* and *Rhynchophorus palmarum*. *Bulletin OEPP/EPPO* 37. 571-579. European and Mediterranean Plant Protection Organization.
- FAO département agriculture, UNICEF.** 1994. Manuel pour la formation en alimentation-nutrition des agents de terrain en Guinée. <http://www.fao.org/docrep/003/X6958F/X6958F00.htm> consulté le 03/12/2012.
- FAO département du développement économique et social.** 2010. Recul de la faim dans le monde qui reste néanmoins à des niveaux inadmissibles. <http://www.fao.org/docrep/012/al390f/al390f00.pdf> consulté le 03/12/2012.
- FAO, OMS.** 2010. Development of regional standard for Edible Crickets and their products. www.codexalimentarius.org/input/download/report/750/REP11_ASe.pdf consulté le 06/04/2013.
- Field, CB., Barros, V., Stocker, TF., Dahe, Q., Dokken, DJ., Ebi, KL., Mastrandrea, MD., Mach, KJ., Plattner, GK., Allen, SK., Tignor, M., Midgley, PM.** 2012. Rapport spécial sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique. 20p. https://www.ipcc-wg1.unibe.ch/srex/downloads/SREX_SPM_French.pdf consulté le 03/12/2012.
- Fohrer, F.** 2008. De l'usage des pièges à lumière ultra violette pour surveiller les risques d'infestation. <http://www.cicrp.fr/docs/pieges-insectes.pdf> consulté le 07/05/2013.
- Fraval, A.** 2007. Le délectable tueur de palmiers. *Insectes* 146. 30-31. <http://www7.inra.fr/opie-insectes/pdf/i146fraval4.pdf>
- Fraval, A., d'Aguilar, J.** 2004. *Glossaire entomologique*. Delachaux et Niestlé SA. 175p.
- Hackstein, JHP., Stumm, CK.** 1994. Methane production in terrestrial arthropods. *Proceeding of the National Academy of Sciences USA*. 91. 5441-5445.
- Hanboonsong, Y.** 2010. Edible insects and associated food habits in Thailand. *Edible forest insects, Human bites back*. 173-182. <http://www.fao.org/docrep/012/i1380e/i1380e00.pdf> consulté le 17/02/2013.
- Hammes, C., Montsarrat, P.** 1974. Recherches sur *Oryctes Rhinoceros* L. *Cah. ORSTOM, sér. Biol* 22. 45-111.
- Hardouin, J.** 1995. Minilivestock: from gathering to controlled production. *Biodiversity and Conservation* 4. 220-232.
- Hardouin, J., Dongmo, T., Ekoue, SK., Loa, C., Malekani, M., Malukisa, M.** 2000. Guide technique d'élevage n° 7 sur les asticots. Bureau pour l'échange et la distribution de l'information sur le mini-élevage.
- Hardouin, J., Mahoux, G.** 2003. *Zootéchnie d'insectes - Elevage et utilisation au bénéfice de l'homme et de certains animaux*. http://www.cd3wd.com/cd3wd_40/stock/001/ITProv_May_2005/h4338f%20Zootehnie/insectes/begin.htm consulté le 30/09/2012.
- Hölldobler, B.** 1981. Foraging and Spatiotemporal Territories in the honey ant *Myrmecocystus mimicus* Wheeler (Hymenoptera: Formicidae). *Behavioral Ecology and Sociobiology* 9. 301-314. Springer-Verlag.
- Igwe, CU., Ujowundu, CO., Nwaogu, LA., Okwu GN.** 2011. Chemical analysis of an edible african termite, *Macrotermes nigeriensis*: a potential antidote to food security problem. *Biochemistry and Analytical Biochemistry* 1. <http://www.omicsonline.org/2161-1009/2161-1009-1-105.pdf> consulté le 06/04/2013.
- Illgner, P., Nel, E.** 2000. The geography of edible insects in Sub-Saharan Africa: a study of the Mopane Caterpillar. *The Geographical Journal* 166.
- Jacotot, B., Campillo, B.** 2003. *Nutrition humaine*. Editions Masson. 198p.
- Janssens, G.** 2009. Répertoire d'analyses de biologie clinique. Institut de biologie clinique. Université libre de Bruxelles. 257p. http://www.ulb-ibc.be/Repertoire_IBC_2009_2.pdf consulté le 03/12/2012.
- Johnson, DV.** 2010. The contribution of edible insects to human nutrition and to forest management. *Edible forest insects, Human bites back*. 5-22. <http://www.fao.org/docrep/012/i1380e/i1380e00.pdf> consulté le 17/02/2013.
- Jourde, P.** 2010. Les odonates, biologie et écologie. *Insectes* 157. p.3-8.
- Koolman, J., Röhm, KH.** 1999. *Atlas de poche de Biochimie*. Médecine-sciences Flammarion. 3^e édition. 477p.
- Larousse Poche Dictionnaire** 2012. 2011. Larousse. 1033p.

- Latham, M.C.** 2001. *La nutrition dans les pays en développement*. Cornell University, Ithaca, New York. <http://www.fao.org/docrep/004/W0073F/W0073F00.HTM> consulté le 03/12/2012.
- Leksawasdi, P.** 2010. Compendium of research on selected edible insects in northern Thailand. *Edible forest insects, Human bites back*. 183-188. <http://www.fao.org/docrep/012/i1380e/i1380e00.pdf> consulté le 22/04/2013
- Leraut, P.** 2003. *Le guide entomologique*. Delachaux et Niestlé SA. 527p.
- Lesourd, B., Ziegler, F., Aussel, C.** 2001. La nutrition des personnes âgées : place et pièges du bilan biologique. *Annales de biologie clinique*. 59. <http://www.jle.com/e-docs/00/00/C4/D2/article.phtml> consulté le 03/12/2012.
- Lindroth, R.L.** 1993. Food conversion efficiencies of insect herbivores. *The Food Insects Newsletter* 6.
- Lokeshwari, R.K., Shantibala, T.** 2010. A review of the fascinating world of insect resources: reason for thoughts. *Psyche: A Journal of Entomology* 2010. Hindawi Publishing Corporation.
- Louey Yen, A.** 2010. Edible insects and other invertebrates in Australia: future prospects. *Edible forest insects, Human bites back*. 65-84. <http://www.fao.org/docrep/012/i1380e/i1380e00.pdf> consulté le 03/02/2013.
- Lubac, S.** 2006. La mouche domestique en élevage de volailles. Institut Technique de l'Aviculture, Lyon.
- Mbahin, N., Raina, S.K., Kioko, E.N., Mueke, J.M.** 2012. Biology of the wild silkworm *Anaphe panda* (Boisduval) in the kakamega forest of Western Kenya. *International Journal of Forestry Research*. Hindawi Publishing Corporation.
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y.** 2010. The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products. *Value of Water Research Report Series* 48.
- Ministère de la santé et des sports.** 2010. Dénutrition, une pathologie méconnue en société d'abondance. <http://www.sante.gouv.fr/les-syntheses-du-pnns.html> consulté le 03/12/2012.
- Mitsuhashi, J.** 2010. The future use of insects as human food. *Edible forest insects, Human bites back*. 115 - 122. <http://www.fao.org/docrep/012/i1380e/i1380e00.pdf> consulté le 09/05/2013.
- N'Gasse, G.** 2003. Contribution des chenilles/larves comestibles à la réduction de l'insécurité alimentaire en République Centrafricaine. *Produits forestiers non ligneux, Document de Travail N° 1*. Programme des produits forestiers non ligneux de la FAO.
- Nations Unies.** 2011. Objectifs du Millénaire pour le développement, rapport 2011. 67p. http://www.un.org/fr/millenniumgoals/pdf/report_2011.pdf. Consulté le 29/11/2012.
- Nations unies,** 2011. World Population Prospects: The 2010 revision. Department of Economic and Social Affairs, Population Division
- Nonaka, K.** 2010. Cultural and commercial roles of edible wasps in Japan. *Edible forest insects, Human bites back*. 123-130. <http://www.fao.org/docrep/012/i1380e/i1380e00.pdf> consulté le 15/03/2013.
- Offenberg, J.** 2011. *Oecophylla smaragdina* food conversion efficiency: prospects for ant farming. *Journal of Applied Entomology* 135. 575- 581.
- OMS.** 2000. La prise en charge de la malnutrition sévère : Manuel à l'usage des médecins et autres personnels de santé à des postes d'encadrement. 63p. <http://whqlibdoc.who.int/hq/1999/a67663.pdf> consulté le 03/12/2012.
- Onyeike, E.N., Ayalogu, O.E., Okaraonye, C.C.** 2005. Nutritive value of the larvae of raphia palm beetle (*Oryctes rhinoceros*) and weevil (*Rhyncophorus phoenicis*). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85. 1822-1828. Society of Chemical Industry.
- Onore, G.** 1997. A brief note on edible insects in Ecuador. *Ecology of Food and Nutrition* 36. 277-285. Overseas Publishers Association.
- Oonincx, D.G.A.B., 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. doi:10.1371/journal.pone.0051145.
- Pachauri, R.K., Reisinger, A.** 2007. Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse. 103 p. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf consulté le 03/12/2012.
- Paoletti, M.G.** 1995. Biodiversity, traditional landscapes and agroecosystem management. *Landscape and urban planning* 31. 117-128. Elsevier Science B.V.
- Paoletti, M.G., Dufour, D.L.** 2005. Edible invertebrates among amazonian indians: a critical review of disappearing knowledge. *Ecological Implications of Minilivestock*. 293-342. Science Publishers.
- Paoletti, M.G., Buscardo, E., Vanderjagt, D.J., Pastuszyn, A., Pizzoferrato, L., Huang, Y.S., Chuang, L.T., Glew, R.H., Millson, M., Cerda, H.** 2003. Nutrient content of termites (*syntermes* soldiers) consumed by makiritare amerindians of the alto orinoco of Venezuela. *Ecology of Food and Nutrition* 42. 173-187. Taylor and Francis.
- Parajulee, M.N., DeFoliart, G.R., Hogg, D.B.** 1993. Model for use in mass-production of *Acheta domesticus* (Orthoptera: Gryllidae) as food. *Journal of Economic Entomology* 86. 1424-1428.
- Pison, G.** 2011. Sept milliards d'êtres humains aujourd'hui, combien demain ? *Populations et sociétés* 482.
- Programme alimentaire mondial.** 2011. Carte de la faim dans le monde 2011. <http://documents.wfp.org/stellent/groups/public/documents/communications/wfp229438.pdf>.
- Raksakantong, P., Meeso, N., Kubola, J., Siriamornpun, S.** 2010. Fatty acids and proximate composition of eight Thai edible termitic insects. *Food Research International* 43. 350-355. Elsevier Ltd.

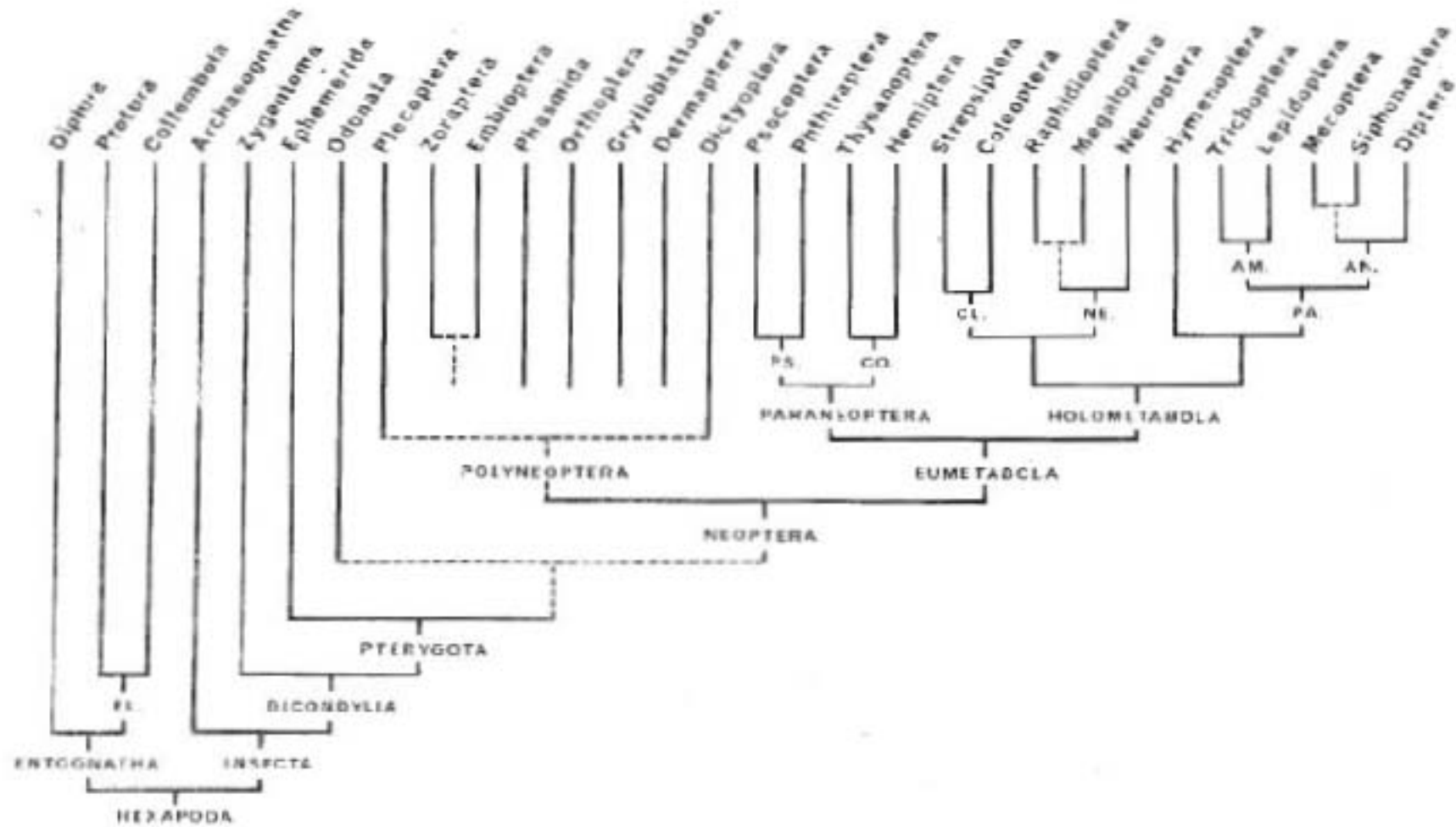
- Ramandey, E., Van Mastrigt, H.** 2010. Edible insects in Papua, Indonesia: from delicious snack to basic need. *Edible forest insects, Human bites back*. 105-114. <http://www.fao.org/docrep/012/i1380e/i1380e00.pdf> consulté le 15/03/2013.
- Ramos-Elorduy, J., Moreno, JMP., Martínez Camacho, VH.** 2009. Edible aquatic Coleoptera of the world with an emphasis on Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine* 5. 13p. BioMed Central Ltd.
- Ramos-Elorduy, J., Moreno, JMP., Martínez Camacho, VH.** 2012. Could grasshoppers be a nutritive meal? *Food and Nutrition Sciences* 3. 164-175. Scientific Research.
- Ramos-Elorduy, J., Moreno, JMP., Vázquez, AI., Landero, I., Olive-Rivera, H., Camacho, VHM.** 2011. Edible Lepidoptera in Mexico: Geographic distribution, ethnicity, economic and nutritional importance for rural people. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine* 7. 22p. BioMed Central Ltd.
- Ramos-Elorduy, J.** 2006. Threatened edible insects in Hidalgo, Mexico and some measures to preserve them. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine* 6. 10p. BioMed Central Ltd.
- Ramos-Elorduy, J.** 2009. Anthro-po-entomophagy: Cultures, evolution and sustainability. *Entomological Research* 39. 271-288. The Entomological Society of Korea and Blackwell Publishing Asia Pty Ltd.
- Ramos-Elorduy, J., Moreno, JMP., Escamilla Prado, E., Alvarado Perez, M., Lagunez Otero, J., Ladron de Guevara, O.** 1997. Nutritional value of edible insects from the state of Oaxaca, Mexico. *Journal of Food Composition and Analysis* 10. p. 142-157. Academic Press.
- Régnière, J.** 2009. Prédire la répartition continentale des insectes à partir de leur physiologie. *Unasylva* 231/232. 60. 37- 42.
- Robert, PA.** 2001. *Les insectes*. Delachaux et Niestlé SA. 461 p.
- Roth, M.** 1980. *Initiation à la morphologie, la systématique et la biologie des insectes*. Editions de la recherche scientifique et technique outre-mer. 259 p.
- Rumpold, BA., Schlüter, OK.** 2013. Potential and challenges of insects as an innovative source for food and feed production. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 17. 1-11.
- Schabel, HG.** 2010. Forest insects as food: a global review. *Edible forest insects, Human bites back*. 37-64. <http://www.fao.org/docrep/012/i1380e/i1380e00.pdf> consulté le 04/02/2013.
- Schlienger, JL.** 2011. *Nutrition clinique pratique*. Editions Elsevier Masson. 317 p.
- Sirimungkararat, S., Saksirirat, W., Nopparat, T., Natongkham, A.** 2010. Edible products from eri and mulberry silkworms in Thailand. *Edible forest insects, Human bites back*. 189-200. <http://www.fao.org/docrep/012/i1380e/i1380e00.pdf> consulté le 28/03/2013.
- Srivastava, SK., Babu, N., Pandey, H.** 2009. Traditional insect bioprospecting- As human food and medicine. *Indian Journal of Traditional Knowledge* 8. 485-494.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., Haan, CD.** 2006. *Livestock's long shadow: Environmental issues and options*. FAO.
- Tabutin, D., Schoumaker, B.** 2004. La démographie de l'Afrique au sud du Sahara des années 1950 aux années 2000. *Populations* 59. 521-622.
- Van Huis, A.** 2003. Insects as food in sub-saharan Africa. *Insect Science and its implications* 23. 163-185.
- Vasson, MP., Jardel, A.** 2005. *Principes de nutrition pour le pharmacien*. Editions TEC&DOC. 475 p.
- Vivatpanish, K., Yhung-aree, J.** 2005. Edible insects in the Laos PDR, Myanmar, Thailand, and Vietnam. *Ecological Implications of Minilivestock*. Science Publishers. 648 p.
- Vorsters, A., Aminou, T., Demey, F.** 1994. Récolte de termites pour l'aviculture à Songhaï (Bénin). *Cahiers de l'agriculture* 3. 265-266.
- Yang, Y., Tang, L., Tong, L., Liu, H.** 2009. Silkworms culture as a source of protein for humans in space. *Advances in Space Research* 43. 1236-1242.
- Yhung-aree, J.** 2010. Edible insects in Thailand: nutritional values and health concerns. *Edible forest insects, Human bites back*. 201 - 216. <http://www.fao.org/docrep/012/i1380e/i1380e00.pdf> consulté le 03/05/2013.
- Ying, F., Xiaoming, C., Long, S., Zhiyong, C.** 2010. Common edible wasps in Yunnan Province, China and their nutritional value. *Edible forest insects, Human bites back*. 93-98. Consulté le 03/05/2013.
- Wang, D., Wei Zhai, S., Xi Zhang, C., Yu Bai, Y., Heng An, S., Nan Xu, Y.** 2005. Evaluation on nutritional value of field crickets as a poultry feedstuff. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 18. 667-670.
- Zaremski, A., Fouquet, D., Louppe, D.** 2009. *Les termites dans le monde*. Editions Quæ. 93 p.

Liste des sites internet consultés

- www.afssa.fr/TableCIQUAL/index.htm consulté le 08/09/2013.
- http://www.ined.fr/fr/pop_chiffres/pays_du_monde/ consulté le 04/02/2013.
- <http://www.insectes.org/opie/monde-des-insectes.html> consulté le 14/05/2013.
- <http://www.mangeons-des-insectes.com/product/sachet-vers-de-farine-comestibles?gclid=CMG33Ymyx7cCFZQZtAodYw8AhA>, consulté le 03 / 06 / 2013
- www.observatoire-prixmarges.franceagrimer.fr consulté le 17/05/2013

Annexes

Annexe 1 : Phylogénie et classification des insectes



AM. : Amphimetanoptera ; AN. : Antlinophora ; CL. : Coleopterida ; CD. : Condylgnatha ; EL. : Ellipura ; NE. : Neuropterida ;
PA. : Panorpida ; PS. : Psocodes.

Annexe 2 : Nombre d'espèces d'insectes consommés dans différents pays et régions du monde (Jongema *in* Rumpold et Schlüter, 2012).

Region	Edible species	Source
Africa	524	Ramos-Elorduy (1997)
Africa	245	van Huis (2003)
Angola	4	Ramos-Elorduy (1997)
Central African Republic	185	Ramos-Elorduy (1997)
Central African Republic	36	Ramos-Elorduy (1997)
Central African Republic	41	Ramos-Elorduy (1997)
Congo	30	DeFoliart (1997)
Madagascar	22	DeFoliart (1997)
South Africa	15	Ramos-Elorduy (1997)
South Africa	36	DeFoliart (1997)
Zaire	31	Ramos-Elorduy (1997)
Zaire	4	Ramos-Elorduy (1997)
Zaire	31	Ramos-Elorduy (1997)
Zaire	51	Ramos-Elorduy (1997)
Zaire	19	Ramos-Elorduy (1997), Ramos-Elorduy et al. (1997)
Zaire	62	DeFoliart (1997)
Zambia	33	Ramos-Elorduy (1997)
Zimbabwe	16	Ramos-Elorduy (1997)
Zimbabwe	32	DeFoliart (1997)
Americas		
Brazil	23	DeFoliart (1997)
Colombia	48	DeFoliart (1997)
Ecuador	83	Onofre (1997)
Oaxaca, Mexico	78	Ramos-Elorduy et al. (1997)
Mexico	545	Ramos-Elorduy (2005)
USA	69	DeFoliart (1997)
Asia		
Burma	17	DeFoliart (1997)
China	46	DeFoliart (1997)
India	24	DeFoliart (1997)
Iran Jaya, New Guinea, Indonesia	> 30	Ponzetti and Pasletti (1997)
Jawa, Indonesia	8	Lukiwati (2010)
Papua, New Guinea, Indonesia	> 95	Ramandey, Mastriq, and van Mastriq (2010)
Indonesia	48	Ramos-Elorduy (1997)
Indonesia	35	DeFoliart (1997)
Japan	119	Ramos-Elorduy (1997)
Japan	27	DeFoliart (1997)
Laos	21	Boulidam (2010)
Sabah, Borneo (Malaysia)	> 60	Chung (2010)
North-East India	81	Chakraverty, Ghosh, and Meyer-Rochow (2011)
Philippines	11	Atalla and Cervantes (2010)
Philippines	21	DeFoliart (1997)
Sri Lanka	33	Nandana, Dissanayake, and Weerasinga (2010)
Thailand	13	Iekawandi and Patton (2010)
Thailand	36	Ramos-Elorduy (1997)
Thailand	80	DeFoliart (1997)
Thailand	194	Simmongkarnat et al. (2010)
Vietnam	24	DeFoliart (1997)
Oceania		
Australia	40	Ramos-Elorduy (1997)
Australia	21	Meyer-Rochow and Changkija (1997)
Australia	49	DeFoliart (1997)
Papua New Guinea	39	Meyer-Rochow (1973)
Papua New Guinea	34	DeFoliart (1997)
New Zealand	4	Meyer-Rochow and Changkija (1997)
Europe		
Italy	5	Breen and Pasletti (2003)
World	>2,000	Jongema (2012)

DEMANDE D'IMPRIMATUR

Date de soutenance : 15 OCTOBRE 2013

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE présenté par : LAVALETTE Marie <u>Sujet</u> : Les insectes : une nouvelle ressource en protéines pour l'alimentation humaine. <u>Jury</u> : Président : Jean-Claude BLOCK, Professeur Directeur : Jean-Claude BLOCK, Professeur Juges : Guillaume BARTOIS, Pharmacien d'officine Jacques FLEURENTIN, Pharmacien d'officine Laurent GODÉ, Ethno-pharmacologue Entomologiste, Responsable de la Mission Biodiversité Du Parc naturel régional de Lorraine	Vu, Nancy, le 3 Septembre 2013 <i>J.-C. Block</i> Le Président du Jury Directeur de Thèse <i>[Signature]</i> 
Vu et approuvé, Nancy, le 12.09.13 Doyen de la Faculté de Pharmacie de l'Université de Lorraine,   Francine PAULUS	Vu, Nancy, le Le Président de l'Université de Lorraine,  Le Président en par délégation Le Vice-Président <i>[Signature]</i> Mardal DELIGNON Pierre MUTZENHARDT N° d'enregistrement : 6588

N° d'identification :

TITRE

LES INSECTES : UNE NOUVELLE RESSOURCE EN PROTEINES POUR
L'ALIMENTATION HUMAINE.

Thèse soutenue le 15 octobre 2013

Par Marie LAVALETTE

RESUME :

De nos jours, la malnutrition reste une des préoccupations majeures des instances mondiales. La croissance démographique et l'appauvrissement des ressources ne permettent pas de contenter les besoins des populations, notamment dans les pays en voie de développement.

L'insecte est une source de protéines à envisager pour sa facilité d'élevage, son faible coût et son faible impact sur l'environnement. Le but serait de remplacer une partie de l'élevage classique des pays en difficulté.

Il est cependant nécessaire de connaître les cycles de développement des insectes et leur biodiversité pour optimiser ce type d'élevage.

Ce travail a pour but de faire le point sur l'état démographique de la population mondiale présent et à venir, l'évolution de la malnutrition et sa localisation.

Dans un second temps, j'ai tenté de recenser les divers insectes utilisés actuellement et la manière de se les procurer et ce qu'un insecte apporte d'un point de vue énergétique et protéique par rapport aux animaux d'élevage classique.

Enfin, j'ai établi une comparaison entre l'élevage traditionnel et l'élevage d'insectes.

MOTS CLES : Insecte, entomophagie, nutrition, malnutrition protéino-énergétique, élevage

Directeur de thèse	Intitulé du laboratoire	Nature	
M. Jean-claude BLOCK	LCPME	Expérimentale	☐
		Bibliographique	X
		Thème	4

Thèmes

1 – Sciences fondamentales

3 – Médicament

5 - Biologie

2 – Hygiène/Environnement

4 – Alimentation – Nutrition

6 – Pratique professionnelle