

**THESE
POUR LE DIPLOME D'ETAT
DE DOCTEUR EN PHARMACIE**

**Soutenue publiquement le 13 Juin 2019
Par Mme Dubois Emilie**

**Les nématodes parasites des plantes: description, moyens
de lutte et impact sur la faim dans le monde**

Membres du jury :

Président : M. Courtecuisse Regis, *Conservateur et Professeur des Universités, Sciences Végétales et fongiques de la faculté de Pharmacie, Université de Lille.*

Directeur, conseiller de thèse : Mme Aliouat-Denis Cécile-Marie, *Maître de Conférences, Parasitologie et Mycologie médicale de la Faculté de Pharmacie, Université de Lille.*

Assesseur : Mme Descamps Eloise, *pharmacienne à Wavrin*



Faculté de Pharmacie
de Lille



3, rue du Professeur Laguesse - B.P. 83 - 59006 LILLE CEDEX

☎ 03.20.96.40.40 - 📠 : 03.20.96.43.64

Université de Lille

Président :	Jean-Christophe CAMART
Premier Vice-président :	Damien CUNY
Vice-présidente Formation :	Lynne FRANJIÉ
Vice-président Recherche :	Lionel MONTAGNE
Vice-président Relations Internationales :	François-Olivier SEYS
Directeur Général des Services :	Pierre-Marie ROBERT
Directrice Générale des Services Adjointe :	Marie-Dominique SAVINA

Faculté de Pharmacie

Doyen :	Bertrand DÉCAUDIN
Vice-Doyen et Assesseur à la Recherche :	Patricia MELNYK
Assesseur aux Relations Internationales :	Philippe CHAVATTE
Assesseur à la Vie de la Faculté et aux Relations avec le Monde Professionnel :	Thomas MORGENROTH
Assesseur à la Pédagogie :	Benjamin BERTIN
Assesseur à la Scolarité :	Christophe BOCHU
Responsable des Services :	Cyrille PORTA

Liste des Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	ALLORGE	Delphine	Toxicologie
M.	BROUSSEAU	Thierry	Biochimie
M.	DÉCAUDIN	Bertrand	Pharmacie Galénique
M.	DEPREUX	Patrick	ICPAL
M.	DINE	Thierry	Pharmacie clinique
Mme	DUPONT-PRADO	Annabelle	Hématologie
M.	GRESSIER	Bernard	Pharmacologie
M.	LUYCKX	Michel	Pharmacie clinique
M.	ODOU	Pascal	Pharmacie Galénique
M.	STAELS	Bart	Biologie Cellulaire

Liste des Professeurs des Universités

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	ALIOUAT	EI Moukhtar	Parasitologie
Mme	AZAROUAL	Nathalie	Physique
M.	BERTHELOT	Pascal	Onco et Neurochimie
M.	CAZIN	Jean-Louis	Pharmacologie – Pharmacie clinique
M.	CHAVATTE	Philippe	ICPAL
M.	COURTECUISSÉ	Régis	Sciences végétales et fongiques
M.	CUNY	Damien	Sciences végétales et fongiques
Mme	DELBAERE	Stéphanie	Physique
M.	DEPREZ	Benoît	Lab. de Médicaments et Molécules
Mme	DEPREZ	Rebecca	Lab. de Médicaments et Molécules
M.	DUPONT	Frédéric	Sciences végétales et fongiques
M.	DURIEZ	Patrick	Physiologie
M.	FOLIGNE	Benoît	Bactériologie

M.	GARÇON	Guillaume	Toxicologie
Mme	GAYOT	Anne	Pharmacotechnie Industrielle
M.	GOOSSENS	Jean François	Chimie Analytique
M.	HENNEBELLE	Thierry	Pharmacognosie
M.	LEMDANI	Mohamed	Biomathématiques
Mme	LESTAVEL	Sophie	Biologie Cellulaire
M.	LUC	Gerald	Physiologie
Mme	MELNYK	Patricia	Onco et Neurochimie
M.	MILLET	Régis	ICPAL
Mme	MUHR – TAILLEUX	Anne	Biochimie
Mme	PAUMELLE-LESTRELIN	Réjane	Biologie Cellulaire
Mme	PERROY	Anne Catherine	Législation
Mme	ROMOND	Marie Bénédicte	Bactériologie
Mme	SAHPAZ	Sevser	Pharmacognosie
M.	SERGHERAERT	Eric	Législation
Mme	SIEPMANN	Florence	Pharmacotechnie Industrielle
M.	SIEPMANN	Juergen	Pharmacotechnie Industrielle
M.	WILLAND	Nicolas	Lab. de Médicaments et Molécules

Liste des Maîtres de Conférences - Praticiens Hospitaliers

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	BALDUYCK	Malika	Biochimie
Mme	GARAT	Anne	Toxicologie
Mme	GOFFARD	Anne	Bactériologie
M.	LANNOY	Damien	Pharmacie Galénique
Mme	ODOU	Marie Françoise	Bactériologie
M.	SIMON	Nicolas	Pharmacie Galénique

Liste des Maîtres de Conférences

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	ALIOUAT	Cécile Marie	Parasitologie
M.	ANTHERIEU	Sébastien	Toxicologie
Mme	AUMERCIER	Pierrette	Biochimie
Mme	BANTUBUNGI	Kadiombo	Biologie cellulaire
Mme	BARTHELEMY	Christine	Pharmacie Galénique
Mme	BEHRA	Josette	Bactériologie
M	BELARBI	Karim	Pharmacologie
M.	BERTHET	Jérôme	Physique
M.	BERTIN	Benjamin	Immunologie
M.	BLANCHEMAIN	Nicolas	Pharmacotechnie industrielle
M.	BOCHU	Christophe	Physique
M.	BORDAGE	Simon	Pharmacognosie
M.	BOSC	Damien	Lab. de Médicaments et Molécules
M.	BRIAND	Olivier	Biochimie
M.	CARNOY	Christophe	Immunologie
Mme	CARON	Sandrine	Biologie cellulaire
Mme	CHABÉ	Magali	Parasitologie
Mme	CHARTON	Julie	Lab. de Médicaments et Molécules
M	CHEVALIER	Dany	Toxicologie
M.	COCHELARD	Dominique	Biomathématiques
Mme	DANEL	Cécile	Chimie Analytique
Mme	DEMANCHE	Christine	Parasitologie
Mme	DEMARQUILLY	Catherine	Biomathématiques
M.	DHIFLI	Wajdi	Biomathématiques
Mme	DUMONT	Julie	Biologie cellulaire
Mme	DUTOUT-AGOURIDAS	Laurence	Onco et Neurochimie
M.	EL BAKALI	Jamal	Onco et Neurochimie
M.	FARCE	Amaury	ICPAL

Mme	FLIPO	Marion	Lab. de Médicaments et Molécules
Mme	FOULON	Catherine	Chimie Analytique
M.	FURMAN	Christophe	ICPAL
Mme	GENAY	Stéphanie	Pharmacie Galénique
M.	GERVOIS	Philippe	Biochimie
Mme	GOOSSENS	Laurence	ICPAL
Mme	GRAVE	Béatrice	Toxicologie
Mme	GROSS	Barbara	Biochimie
M.	HAMONIER	Julien	Biomathématiques
Mme	HAMOUDI	Chérifa Mounira	Pharmacotechnie industrielle
Mme	HANNOTHIAUX	Marie-Hélène	Toxicologie
Mme	HELLEBOID	Audrey	Physiologie
M.	HERMANN	Emmanuel	Immunologie
M.	KAMBIA	Kpakpaga Nicolas	Pharmacologie
M.	KARROUT	Youness	Pharmacotechnie Industrielle
Mme	LALLOYER	Fanny	Biochimie
M.	LEBEGUE	Nicolas	Onco et Neurochimie
Mme	LECOEUR	Marie	Chimie Analytique
Mme	LEHMANN	Hélène	Législation
Mme	LELEU-CHAVAIN	Natascha	ICPAL
Mme	LIPKA	Emmanuelle	Chimie Analytique
Mme	MARTIN	Françoise	Physiologie
M.	MOREAU	Pierre Arthur	Sciences végétales et fongiques
M.	MORGENROTH	Thomas	Législation
Mme	MUSCHERT	Susanne	Pharmacotechnie industrielle
Mme	NIKASINOVIC	Lydia	Toxicologie
Mme	PINÇON	Claire	Biomathématiques
M.	PIVA	Frank	Biochimie
Mme	PLATEL	Anne	Toxicologie
M.	POURCET	Benoît	Biochimie
M.	RAVAUX	Pierre	Biomathématiques

Mme	RAVEZ	Séverine	Onco et Neurochimie
Mme	RIVIERE	Céline	Pharmacognosie
Mme	ROGER	Nadine	Immunologie
M.	ROUMY	Vincent	Pharmacognosie
Mme	SEBTI	Yasmine	Biochimie
Mme	SINGER	Elisabeth	Bactériologie
Mme	STANDAERT	Annie	Parasitologie
M.	TAGZIRT	Madjid	Hématologie
M.	VILLEMAGNE	Baptiste	Lab. de Médicaments et Molécules
M.	WELTI	Stéphane	Sciences végétales et fongiques
M.	YOUS	Saïd	Onco et Neurochimie
M.	ZITOUNI	Djamel	Biomathématiques

Professeurs Certifiés

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	HUGES	Dominique	Anglais
Mlle	FAUQUANT	Soline	Anglais
M.	OSTYN	Gaël	Anglais

Professeur Associé - mi-temps

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	DAO PHAN	Hai Pascal	Lab. Médicaments et Molécules
M.	DHANANI	Alban	Droit et Economie Pharmaceutique

Maîtres de Conférences ASSOCIES - mi-temps

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	BRICOTEAU	Didier	Biomathématiques
Mme	CUCCHI	Malgorzata	Biomathématiques
M.	FRIMAT	Bruno	Pharmacie Clinique
M.	GILLOT	François	Droit et Economie pharmaceutique
M.	MASCAUT	Daniel	Pharmacie Clinique
M.	ZANETTI	Sébastien	Biomathématiques
M.	BRICOTEAU	Didier	Biomathématiques

AHU

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	DEMARET	Julie	Immunologie
Mme	HENRY	Héloïse	Biopharmacie
Mme	MASSE	Morgane	Biopharmacie

Faculté de Pharmacie de Lille

3, rue du Professeur Laguesse - B.P. 83 - 59006 LILLE CEDEX

Tel. : 03.20.96.40.40 - Télécopie : 03.20.96.43.64

<http://pharmacie.univ-lille2.fr>

L'Université n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses ; celles-ci sont propres à leurs auteurs.

REMERCIEMENTS

A mon président de thèse, M. Courtecuisse Regis, Conservateur et Professeur des Universités, Sciences Végétales et fongiques de l'université Lille II de pharmacie

Merci de me faire l'honneur de juger mon travail et de présider cette thèse, veuillez trouver ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

A ma directrice de thèse, Mme Aliouat Cécile-Marie, Maître de Conférences, Parasitologie et Mycologie médicale de l'université Lille II de pharmacie

Pour de m'avoir proposé ce sujet et surtout d'avoir accepté de le diriger. Merci pour votre patience, vos conseils et votre disponibilité malgré un planning chargé. Veuillez trouver ici mes sincères remerciements.

A Mme Descamps Eloise, pharmacien à Wavrin.

Pour l'honneur que vous me faites de siéger parmi ce jury. Veuillez trouver l'expression de ma sincère reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent aussi :

A Mme Djian-Caporalino Caroline, Ingénieur de Recherche - IR - Univ. Nice Sophia Antipolis - Cnrs- Inra PACA

Je tenais à vous remercier pour le temps passé à répondre à mes multiples questions et pour m'avoir conseillé et envoyé un grand nombre de références bibliographiques.

Je dédie cette thèse :

A mes parents, maman, papa, Sylvie, merci pour vos précieux conseils et merci de m'avoir soutenue durant toutes ces années.

A mes grands-parents qui sont des grands modèles pour moi.

A mes frères et sœur.

Aux autres membres de ma famille, tatas, tontons, cousins et cousines qui ont toujours été là pour moi

A julien, merci de m'avoir soutenue et surtout d'avoir été aussi patient durant toutes ces années. Tu es la plus belle chose qui me soit arrivée et maintenant nos destins sont liés à jamais.

A mes amis proches, qui sont comme ma famille.

A ceux partis trop tôt, Papy et Phil, on ne vous oublie pas.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	13
TABLE DES ILLUSTRATIONS	17
TABLE DES ANNEXES	21
GLOSSAIRE	23
INTRODUCTION	29
I)Etat des lieux de la faim dans le monde.	33
a)Etat des lieux géographique et démographique.	33
1.La sous-alimentation dans les grandes régions du monde	34
2.Quelques chiffres du rapport des Nations Unis sur la Sécurité alimentaire.	36
b)Causes de la sous-alimentation.	41
1.La pauvreté.....	41
2.Le problème d'accès à l'eau potable.	44
3.Le développement inégal de l'agriculture dans le monde	46
4.Autres causes.....	50
II)Les nématodes parasites de plantes.	55
a)Description et classification des nématodes.	55
1.Généralités sur les nématodes	55
2.Classification des nématodes	57
3.Description morphologique des nématodes phytopathogènes.....	60
4.Modes de reproduction chez les nématodes phytoparasites (d'après Weischer & Brown, 2000).....	62
5.Relation des nématodes phytopathogènes avec le milieu.	64
6.Cycle de vie des nématodes phytopathogènes à galles et à kyste.....	65
b)Les différents modes de parasitismes des Nématodes.	73
1.Les ectoparasites (figure 28) :	73
2.Les endoparasites migrateurs (figure 29):	74
3.Les endoparasites sédentaires (figure 30) :	75

4. Les semi-endoparasites (figure 31) :	76
5. Les Nématodes des tiges et des bulbes (figure 32):	77
6. Nématodes foliaires (figure 33):	78
7. Différents types de stylets.	79
c) Classement des principales espèces de nématodes phytopathogènes. ...	80
d) Symptômes et impacts qu'ils produisent sur les plantes.	86
1. Cas des nématodes à galles.	89
2. Cas des nématodes à kystes.	91
III) Moyens de lutte contre les nématodes phytopathogènes...	95
a) Les mesures prophylactiques.....	96
b) La lutte Chimique.....	97
1. La méthode par fumigation :	98
2. La méthode par action systémique :	99
3. Principales substances chimiques utilisées.	100
4. Substances chimiques en cours de recherche.	101
c) La lutte physique.	102
1. La jachère nue :	102
2. La submersion :	102
3. La vapeur d'eau sous pression :	103
4. La solarisation :	105
d) La lutte biologique :	106
1. Les plantes pièges	106
2. <i>Pasteuria penetrans</i> : la bactérie parasite des nématodes :	111
3. Les champignons	113
4. La bactérie : <i>Bacillus firmus</i> :	123
e) La lutte génétique.....	125
1. Les résistances génétiques naturelles.	125
2. Les résistances génétiques artificielles.	129
IV) Perspectives d'avenir pour atteindre l'équilibre alimentaire sur la planète.	135

a)Modification de nos habitudes alimentaires : Entomoculture et l'entomophagie.	135
1.Définitions :	135
2.Espèces comestibles :	138
3.Différents types d'élevage :	142
4.Intérêts favorables de la consommation d'insectes :	145
6.Règlementation française :	151
b)Modification des techniques agricoles.	152
1.L'agriculture moderne et ses conséquences :	152
2.L'agriculture durable :	153
CONCLUSION	159
BIBLIOGRAPHIE	161
ANNEXE 1 : Fiche sécurité du FLOCTER	169
ANNEXE 2 : Fiche sécurité du FLOCTER	177
ANNEXE 3 : Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail datant du 12 février 2015	193
ANNEXE 4 : Texte officiel publié dans le JO du sénat français le 02 Mars 2017 afin de sécuriser la vente des insectes comestibles pour l'homme :	255
ANNEXE 5: Les 27 principes pour l'agriculture durable ratifiés à Rio en Juin 1992	259

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure n°1 : Population en état de sous-alimentation (en millions)

Figure n°2: Nombre de personnes souffrant de sous-alimentation en fonction de l'année

Figure n°3 : Prévalence et nombre de personnes sous-alimentées dans le monde pendant la période 2000-2016

Figure n°4 : Prévalence de la sous-alimentation dans le monde de 2000 à 2016

Figure n°5 : Prévalence de la sous-alimentation en fonction du temps

Figure n°6 : Nombre de personnes très pauvres dans le monde

Figure n°7 : Population sous le seuil de pauvreté (en %)

Figure n°8 : Population n'ayant pas accès à l'eau potable selon la région du monde

Figure n°9 : Carte du monde représentant la population n'ayant pas accès à l'eau potable

Figure n°10 : Etat de dégradation des sols à l'échelle mondiale

Figure n°11 : Evolution de l'indice des prix mondiaux des produits agricoles, alimentaires ou non, de 1960 à 2000 (base 100 pour 1990)

Figure n°12 : Les inégalités d'agricultures mondiales

Figure n°13 : La population rurale et urbaine dans le monde de 1960 à 2050

Figure n°14 : Mode de vie des différentes espèces de nématodes

Figure n°15 : Phylogénie des métazoaires basée sur les séquences 18S de l'ARN ribosomal

Figure n°16 : Phylogénie du phylum des nématodes

Figure n°17 : Anatomie générale d'un nématode

Figure n°18 : Schéma de comparatif de nématodes phytopathogènes, femelle et mâle

Figure n°19 : Exemples de durée du cycle de vie, de fécondité et de modes de reproduction chez quelques espèces de nématodes phytoparasites

Figure n°20 : Cycle de développement des nématodes à galles

Figure n°21 : Cycle biologique schématique d'un endoparasite sédentaire à galles (d'après Bridge and Starr (2007)) et exemples (photographies au microscope optique) (crédits: ANSES, LSV)

Figure n°22: Cycle biologique schématique d'un endoparasite sédentaire à kyste (d'après Bridge and Starr (2007)) et exemples (photographies au microscope optique) (crédits: ANSES, LSV)

Figure n°23 : Photo de nématodes femelles et de kystes

Figure n°24 : Photo de kystes sur des racines

Figure n°25 : Photo de galles sur une racine de salade

Figure n°26 : Photo de galles sur des racines de tomates

Figure n°27 : Photo de carottes infestées par des nématodes

Figure n°28 : Coupe longitudinale d'une racine parasitée par des nématodes ectoparasites

Figure n°29 : Coupe longitudinale d'une racine parasitée par des nématodes endoparasites migrants

Figure n°30 : Coupe transversale d'une racine parasitée par des nématodes endoparasites sédentaires

Figure n°31 : : Schéma du cycle de vie des nématodes ecto-endoparasites

Figure n°32 : Schéma d'un bulbe infecté par des nématodes

Figure n°33 : Schéma d'une plante infectée par des nématodes foliaires

Figure n°34 : Représentation des modes de parasitisme des nématodes parasites de racines

Figure n°35 : Clé de classification des nématodes phytopathogènes

Figure n°36 : Classement des principales espèces de nématodes parasites de plantes

Figure n°37 : Importance économique mondiale des nématodes phytoparasites en milliards d'euro

Figure n°38 : Système de notation des indices de galles pour estimer les dégâts dus aux nématodes à galles du genre *Meloidogyne* (selon Netscher et Sikora, 1990)

Figure n°39 : Photos montrant l'invasion par les nématodes à galles de différentes plantes

Figure n° 40 : Photo de kystes de nématodes sur des racines de plantes

Figure n°41 : Photo représentant la méthode par fumigation

Figure n°42 : Principaux modes d'action des insecticides systémiques

Figure n°43 : Situation des différents nématicides au vue de l'inscription au niveau européen et français

Figure n°44 : Molécules chimiques à l'étude dans la lutte contre les nématodes

Figure n°45 : Température à laquelle les différents pathogènes de plantes sont détruits

Figure n°46 : Schéma d'un générateur Regero permettant la désinfection à la vapeur des sols

Figure n°47 : Photo d'un automate Regero permettant la désinfection à la vapeur des sols

Figure n°48 : solarisation en plein champ et sous abri

Figure n°49 : Plantes non-hôtes ou mauvais-hôtes des nématodes à galles, susceptibles d'être utilisées en maraîchage

Figure n° 50 : Schéma de spores de *Pasteuria Penetrans* collées sur la cuticule partie d'un nématode

Figure n°51 : Schéma du filament de *Pasteuria Penetrans* perforant la cuticule du nématode

Figure n°52 : Schéma des différents mécanismes de capture des champignons prédateurs des nématodes.

Figure n°53 : Schéma d'un nématode capturé par *A. irregularis*

Figure n°54 : Œuf de Nématode parasité par un Champignon ovicide

Figure n°55 : Photo microscopique de *Paecilomyces lilacinus* parasitant des œufs de *Meloidogyne*

Figure n°56 : Schéma d'*Hirsutella* parasitant un nématode

Figure n°57 : Dessin d'endomycorhize à arbuscule dans les cellules d'une racine

Figure n°58 : Principaux agents biologiques luttant contre les nématodes

Figure n°59 : Cartographie des gènes de résistance aux nématodes endoparasites sédentaires (liste non exhaustive)

Figure n° 60 : Nombre d'espèces d'insectes comestibles répertoriés par région dans le monde

Figure n°61 : Pourcentage d'espèces comestibles présent dans chaque ordre d'insectes

Figure n°62 : Photo d'un coléoptère sous forme adulte et larvaire

Figure n°63 : Cycle de vie d'un lépidoptère (métamorphose complète)

Figure n°64 : Cycle de vie d'un orthoptère (métamorphose incomplète)

Figure n°65 : Photos d'un élevage de grillons

Figure n°66 : Photos d'un élevage de vers de farine

Figure n°67 : Tableau comparatif des micronutriments présents dans différents aliments

Figure n°68 : Comparaison d'une exploitation conventionnelle face à une exploitation d'agriculture durable

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Fiche sécurité du FLOCTER°

Annexe 2 : Fiche technique du FLOCTER°

Annexe 3 : Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail datant du 12 février 2015

Annexe 4 : Texte officiel publié dans le JO du sénat français le 02 Mars 2017 afin de sécuriser la vente des insectes comestibles pour l'homme :

Annexe 5 : Les 27 principes pour l'agriculture durable ratifiés à Rio en Juin 1992

GLOSSAIRE

Actinomycète :

Bactérie ressemblant aux champignons microscopiques, que l'on trouve dans le sol, l'eau et la matière en décomposition

Agriculture Productiviste :

(source : <https://www.etudier.com/dissertations/Agriculture-Productiviste/98605.html>)

L'agriculture productiviste est un système de production agricole cherchant à maximiser la production par rapport aux facteurs de production, qu'il s'agisse de la main d'œuvre, du sol ou des autres moyens de production, tel que le matériel agricole

Anastomose :

Communication naturelle ou établie chirurgicalement entre deux organes, deux vaisseaux, deux conduits de même nature ou deux nerfs

ANSES = Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

L'Anses est un établissement public à caractère administratif placé sous la tutelle des ministères chargés de la Santé, de l'Agriculture, de l'Environnement, du Travail et de la Consommation.

L'Anses assure des missions de veille, d'expertise, de recherche et de référence sur un large champ couvrant la santé humaine, la santé et le bien-être animal ainsi que la santé végétale. Elle offre une lecture transversale des questions sanitaires en évaluant les risques et les bénéfices sanitaires, souvent au prisme des sciences humaines et sociales. Ses missions de veille, de vigilance et de surveillance permettent de nourrir l'évaluation des risques. L'Agence évalue ainsi l'ensemble des risques (chimiques, biologiques, physiques...) auxquels un individu peut être exposé, volontairement ou non, à tous les âges et moments de sa vie, qu'il s'agisse d'expositions au travail, pendant ses transports, ses loisirs, ou via son alimentation. (Source : <http://www.bdsp.ehesp.fr/reseau/anses>)

Blastopore :

Un blastopore est un orifice unique de l'embryon au stade gastrula, qui donnera la bouche chez les invertébrés et l'anus chez les vertébrés.

Caractère endophyte :

endophyte : organisme vivant au sein des tissus d'un végétal, dans les espaces inter- et intracellulaires (relation trophique pas forcément parasitaire, même parfois au contraire)

Chimiotactisme :

Propriété de certaines cellules, de certains organismes d'être attirés ou repoussés par des substances chimiques.

Clade :

Groupement de plusieurs embranchements de plantes ou d'animaux ayant une organisation et un ancêtre commun.

Commerce équitable :

Echange économique où la partie la plus puissante s'engage à respecter les intérêts de la partie la plus défavorisée.

Cryptobiose :

La cryptobiose désigne un état complètement arrêté du métabolisme (tout du moins non mesurable avec les techniques actuelles) d'un organisme.

FAO = Food & Agriculture Organisation

(Source http://www.dictionnaire-environnement.com/food_agriculture_organisation_fao_ID2661.html)

L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (Food & Agriculture Organisation -FAO) est une institution spécialisée des Nations Unies (ONU). La FAO a été créée en 1945, pour l'alimentation, dans son sens le plus large, qui inclut notamment l'agriculture, les forêts, les pêches et les industries se rattachant directement à l'alimentation. La FAO intervient notamment en cas de famine, de crise alimentaire et agricole.

Haploïde :

Se dit du noyau et d'une cellule qui possède un seul jeu de chromosome, ainsi que de l'organisme ou de la phase de son cycle biologique dont les cellules possèdent un seul jeu de chromosome.

Hyphe :

Filament constitutif du mycélium des champignons supérieurs et des lichens.

Hyphomycètes :

Les Hyphomycètes sont un groupe de champignons dont certains sont des espèces aquatiques. Il s'agit d'une classe traditionnelle regroupant les formes asexuées de champignons mais celle-ci est aujourd'hui caduque puisque les anamorphes - stades asexués - sont redistribués dans de nombreux taxons en fonction de la phylogénie moléculaire.

Intrant :

(Source : <https://www.doc-developpement-durable.org/documents-pedagogiques-de-sensibilisation/enjeux-de-l-agriculture-biologique.pdf>)

En agriculture, on appelle « intrants » les différents produits apportés aux terres et aux cultures, qui ne proviennent ni de l'exploitation agricole, ni de sa proximité. Les intrants ne sont pas naturellement présents dans le sol, ils y sont rajoutés pour améliorer le rendement des cultures.

Métamorphose :

(Source : <http://passion-entomologie.fr/metamorphose-chez-les-insectes/>)

Changement morpho-anatomique et physiologique, irréversible, changeant le plan d'organisation d'un animal survenant lors du passage à l'état adulte. A l'issue de ce dernier stade de développement, il y a acquisition de la capacité de reproduction, de la morphologie et des organes définitifs.

Métamorphose complète = Holo métabolisme :

(Source : <http://passion-entomologie.fr/metamorphose-chez-les-insectes/>)

Ce type de développement caractérise les insectes dont la morphologie, la biologie, l'alimentation et l'écologie des larves ne ressemblent en rien à celles des adultes (imago). De plus, le passage de l'état larvaire à l'état adulte se fait lors d'un stade nymphal (cocon, pupa ou chrysalide). Les caractères morphologiques définitifs de l'adulte sont acquis durant cette phase

Métamorphose incomplète = Hémi métabolisme :

(Source : <http://passion-entomologie.fr/metamorphose-chez-les-insectes/>)

Ce type de développement caractérise les insectes dont la morphologie et le régime alimentaire des larves ressemblent à ceux des adultes (imago). Dans ce cas, elles seront appelées juvéniles. Le passage de l'état larvaire à l'état adulte ne se fait pas par un stade nymphal (cocon ou chrysalide). Les caractères morphologiques, comme les ailes, se développent progressivement au cours de chaque mue.

OMS :

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) est l'institution spécialisée des Nations Unies pour la santé. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), fondée le 7 avril 1948, a pour but d'amener tous les peuples au niveau de santé le plus élevé possible.

Phylum :

Lignée d'espèces qui sont toutes issues d'un même ancêtre.

Plante vivrière :

L'agriculture vivrière est une agriculture essentiellement tournée vers l'autoconsommation et l'économie de subsistance. La production n'est destinée ni à l'industrie agroalimentaire ni à l'exportation. Elle est en grande partie auto-consommée par les paysans et la population locale.

QTL :

Un locus de caractères quantitatifs (LCQ ou QTL pour quantitative trait loci) est une région plus ou moins grande d'ADN qui est étroitement associée à un caractère quantitatif, c'est-à-dire une région chromosomique où sont localisés un ou plusieurs gènes à l'origine du caractère en question.

Ravinement :

Détérioration d'une surface, créée par l'écoulement des eaux.

Rhizome :

Tige souterraine, qui porte des racines et des tiges aériennes.

Syncytium :

Cytoplasme qui comporte plusieurs noyaux.

Tellurique :

Qui provient ou inféodé au sol.

Vermiforme :

En forme de ver.

INTRODUCTION

« (...) Le problème de la faim était déjà grave quand les prix de la nourriture étaient raisonnables et que le monde vivait une période de prospérité. Mais la crise alimentaire mondiale (2006-2008), suivie de la crise économique, a créé une situation catastrophique (...)», constate M. Daniel Gustafson, directeur du bureau de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)

A ce jour, presque 900 millions de personnes sont sous alimentées dans le monde. Ce chiffre est malheureusement en constante augmentation, la faim est d'ailleurs la principale cause de mortalité dans le monde.

Ceci est aberrant surtout lorsque l'on constate qu'en parallèle les productions agricoles mondiales ont augmenté plus vite que la population. Alors pourquoi n'arrive-t-on pas à répondre aux besoins alimentaires de la population mondiale ?

Il existe de nombreuses causes bien connues de la faim dans le monde : la pauvreté, les conflits, les problèmes d'accès à l'eau potable etc.

Cependant, il en existe une, beaucoup moins connue mais non négligeable : les nématodes parasites de plantes.

Les nématodes phytopathogènes sont des parasites dont l'impact global sur les rendements agricoles est parfois négligé.

Cependant certaines espèces peuvent engendrer d'importantes baisses de rendement sur des cultures essentielles pour l'alimentation Humaine.

Aujourd'hui, les nématodes causent 12 à 20% des pertes agricoles mondiales. En effet même si leur taille est microscopique, ils ont une répartition cosmopolite et s'adaptent aux différents types de sols et de climats.

Dans cette thèse je développe tout d'abord les principales causes de la faim dans le monde. Puis je m'intéresse plus particulièrement aux nématodes en décrivant leur morphologie pour ensuite énumérer les moyens de lutte. Enfin je termine par les différentes perspectives globales qui existent pour combattre ce fléau qu'est la faim dans le monde.

CHAPITRE I

Etat des lieux de la
faim dans le monde

I) Etat des lieux de la faim dans le monde.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord faire un rapide état des lieux géographique et démographique de la faim dans le monde, nous allons ensuite répertorier les différentes causes qui provoquent ce phénomène.

a) Etat des lieux géographique et démographique.

Dans le monde, nous dénombrons un peu plus de 800 millions de personnes qui souffrent de sous-alimentation, soit une personne sur 10 qui est privée de la nourriture indispensable pour mener une vie saine et active. (Rapport FAO 2006 - *l'état de l'insécurité dans le monde*).

Selon le rapport *CNUCED-ONU* de 2005, un enfant meurt toutes les 5 secondes des conséquences de la faim et une personne sur 20 perdrait la vue par manque de vitamine A

La faim et la malnutrition provoquent et induisent les problèmes de santé les plus meurtriers dans le monde.

En effet, outre les millions d'affamés dans le monde, on peut y ajouter un milliard de personnes malnutries : carences en vitamines, en nutriments, en protéines... Ces situations sont dues au fait que dans certaines régions du monde, la population ne se nourrit que d'un seul aliment (exemple du riz, manioc etc.)

La FAO est une institution créée en 1945 par les Nation Unies. Elle est une tribune neutre pour réunir tous les pays du monde sur le thème de l'alimentation au sens large (ce qui inclut notamment l'agriculture, les forêts, les pêches et les industries s'y rattachant).

Elle est aussi une source de savoir et d'informations fiable.

1. La sous-alimentation dans les grandes régions du monde

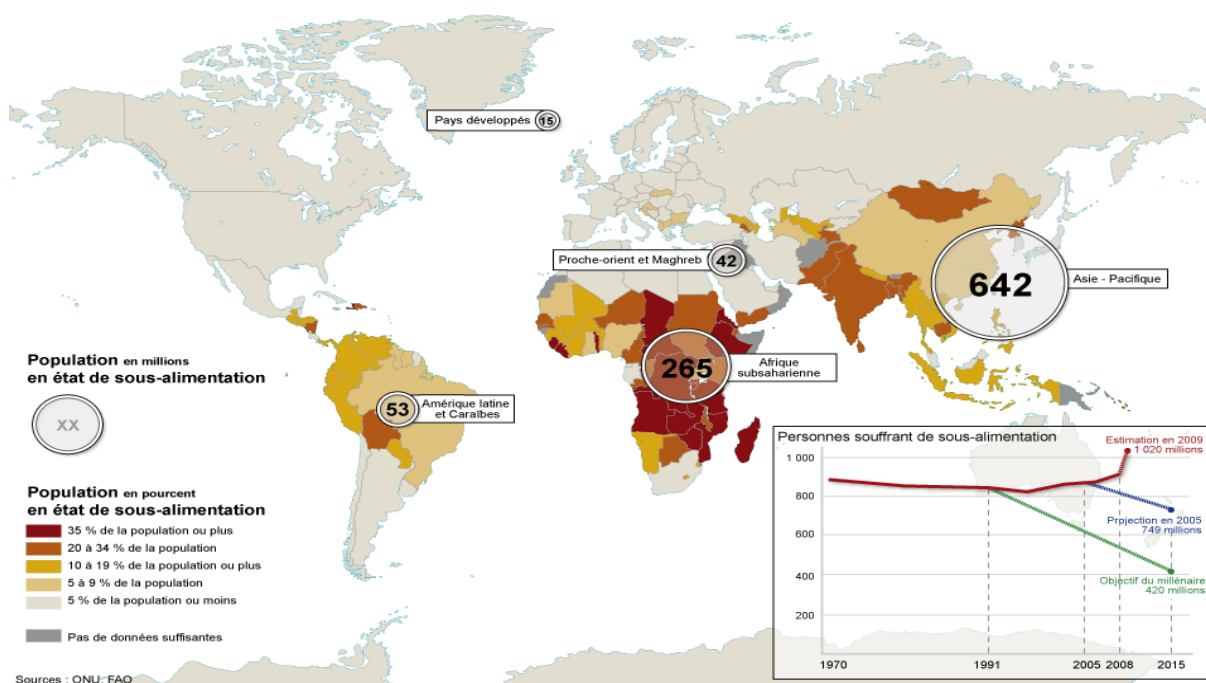


Figure 1 : Population en état de sous-alimentation (en millions)

Source : FAO- la faim dans le monde en 2009

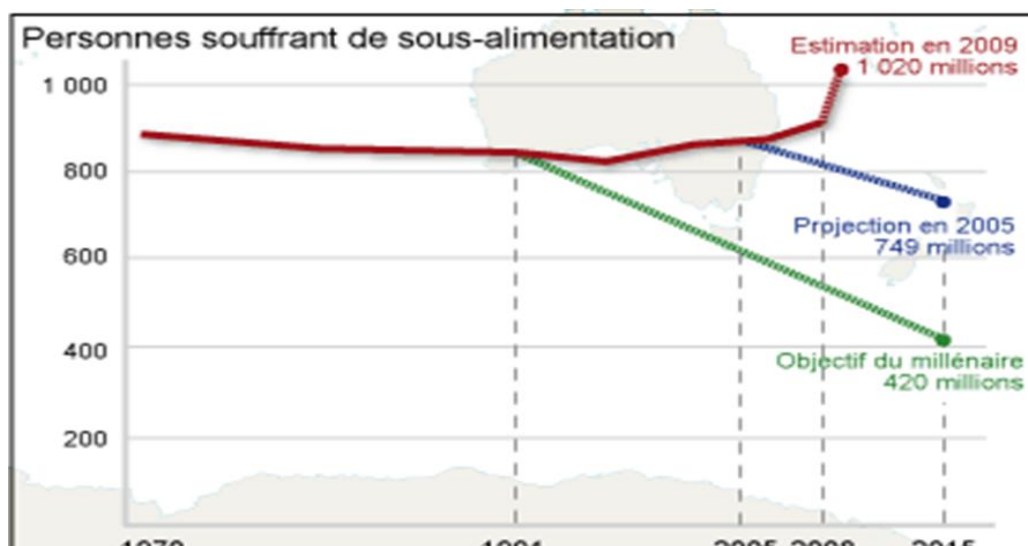


Figure 2 : Nombre de personnes souffrant de sous-alimentation en fonction de l'année

Source : FAO- la faim dans le monde en 2009

Sur la figure 1, nous pouvons observer qu'il existe plusieurs grandes régions où la sous-alimentation est dominante :

- L'Asie
- L'Afrique
- L'Amérique du sud

On distingue aussi une quantité non négligeable de population sous-alimentée au Proche-Orient ainsi que dans les pays dits « développés ».

Enfin on remarque que ce sont essentiellement, des pays en voie de développement qui sont touchés, et surtout une population rurale et pauvre .

La figure 2 est un graphe représentant le nombre de personnes souffrant de sous-alimentation en fonction de l'année.

On remarque avec la courbe rouge que le nombre de personnes sous alimentées n'a pas réellement évolué depuis les années 70. Cependant, on estime qu'à partir de 2008 celui-ci va connaître une croissance exponentielle.

La courbe verte représente l'objectif que l'on a établie en 1991 pour 2015. En effet, en 1991, on avait pour objectif de diminuer à 420 millions le nombre de personnes sous alimentées. On sait maintenant que ce but n'a pas été atteint.

La courbe bleue représente ce que l'on prévoyait en 2005. En effet en 2005, on prévoyait 749 millions de personnes sous alimentées pour l'année 2015. Ce qui est proche de la réalité.

Ils estimaient qu'en 2009, le nombre de personnes sous-alimentées allait dépasser le milliard, cependant cette population augmente mais pas à ce point puisqu'aujourd'hui, on dénombre un peu plus de 800 millions de personnes souffrant de sous-alimentation et non 1020 millions.

En conclusion de ce graphe, on peut voir que la sous-alimentation mondiale reste constante et augmente même malgré les différentes prévisions que la FAO a pu faire durant les 30 dernières années.

2. Quelques chiffres du rapport des Nations Unies sur la Sécurité alimentaire.

Selon le dernier rapport annuel des Nations Unies sur la sécurité alimentaire mondiale et la nutrition datant de Septembre 2017, les chiffres étaient de 815 millions de personnes sous-alimentées.

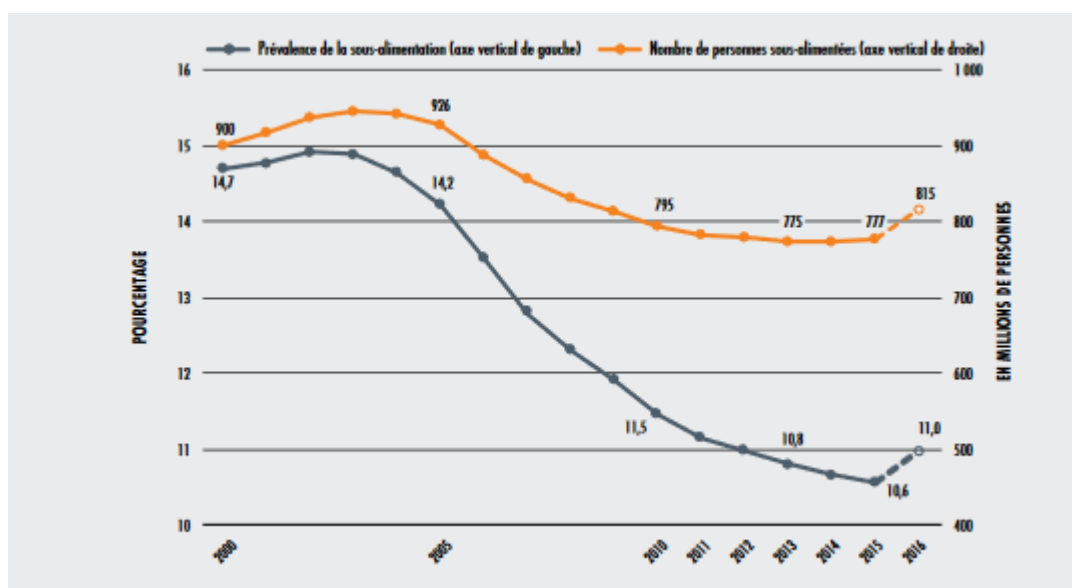


Figure 3 : Prévalence et nombre de personnes sous-alimentées dans le monde pendant la période 2000-2016

Source : FAO de septembre 2017

Nous savons aussi, selon ce rapport que sur les 815 millions de personnes sous-alimentées en 2016, on retrouve :

- 520 millions de personnes en Asie
- 243 millions de personnes en Afrique
- et 42 millions en Amérique latine et Caraïbes

Quand on compare avec la figure 1, on remarque que ces trois régions sont les mêmes qu'en 2009.

Sur la figure 3, on remarque que la faim dans le monde qui était à la baisse, subit un renversement à partir de 2015. En effet, on peut voir qu'il y eu en 2016, 38 millions de personnes sous-alimentées en plus par rapport à 2015.

Alors pourquoi ce renversement brutal en si peu de temps ?

Selon l'OMS, on peut associer ce phénomène par :

- La prolifération des conflits violents, complexes et de plus en plus difficiles à résoudre.

On peut prendre l'exemple du Soudan du sud et sa déclaration d'indépendance de décembre 2013. Elle a entraîné une flambée de violence dans la région du Haut-Nil, qui s'est progressivement propagée au Grand Equatoria et au Bahr el Ghazal occidental.

Selon le rapport de l'OMS : « (...) Sous l'effet du conflit en cours, l'insécurité aiguë a augmenté d'une manière exponentielle et la famine a été déclarée dans certaines parties de l'Etat d'Unité en février 2017 (...) plus de 4,9 millions de personnes (soit plus de 42 % de la population) sont actuellement en situation d'insécurité alimentaire grave (...) La production agricole et les systèmes alimentaires ont été perturbés, l'élevage a décliné de manière considérable et la violence qui se propage vers les greniers céréaliers de l'Equatoria a de graves effets sur la production. La violence limite l'accès aux marchés et désorganise les flux commerciaux, n'épargnant ni les éleveurs, ni les consommateurs, ni les négociants (...) »

Source : Editorial du magazine Reporterre du 16 Octobre 2017

- Les phénomènes climatiques extrêmes accentués par le changement climatique.

Ici on peut prendre l'exemple du courant El Niño qui est une augmentation anormale de la température des eaux du Pacifique-Est, le long des côtes de l'Amérique du Sud.

Ce phénomène a des répercussions sur toutes les parties du monde :

- En Indonésie, il entraîne sécheresses et incendies.
- En Amérique latine, il provoque de très fortes précipitations dans des régions habituellement peu pluvieuses pouvant entraîner d'importantes inondations.

- En Amérique du Sud, il augmente la température de l'eau. Elles deviennent donc bien moins poissonneuses que les eaux froides riches en plancton.
- En Inde, on observe une baisse des moussons, dont dépendent les productions agricoles qui sont donc moins abondantes.

Le rapport de 2017 nous donne quelques autres chiffres que nous allons décrire :

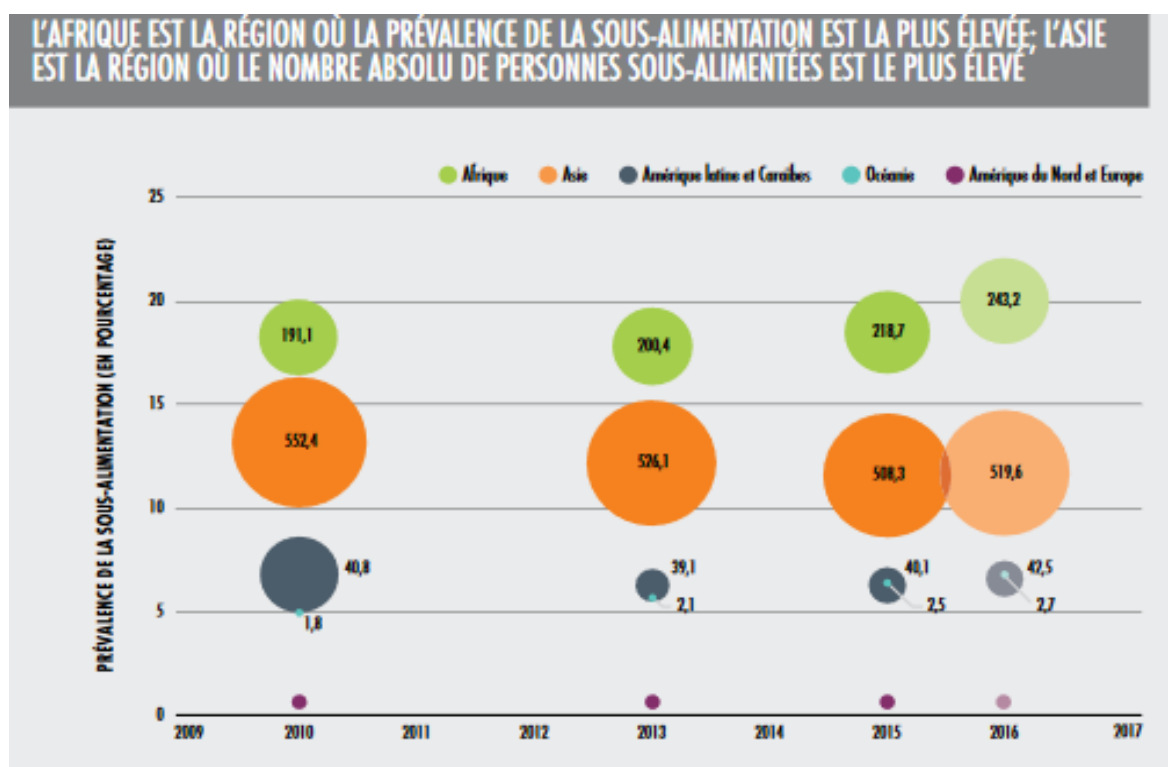
	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016 ¹
	En pourcentage								
MONDE ENTIER	14,7	14,2	11,5	11,2	11,0	10,8	10,7	10,6	11,0
AFRIQUE	24,3	20,8	18,3	17,9	17,8	17,8	18,1	18,5	20,0
Afrique du Nord	6,8	6,3	5,1	4,8	8,5	8,4	8,3	8,3	8,3
Afrique subsaharienne	28,1	23,7	20,6	20,2	20,0	20,0	20,4	20,8	22,7
Afrique de l'Est	39,3	34,3	30,9	30,2	30,6	30,6	30,9	31,1	33,9
Afrique centrale	37,4	29,4	23,8	23,1	22,5	22,3	24,0	24,4	25,8
Afrique australe	7,1	6,4	6,7	6,3	6,2	6,2	6,5	6,6	8,0
Afrique de l'Ouest	15,1	12,0	10,0	9,9	9,9	9,8	9,8	10,4	11,5
ASIE	16,7	17,0	13,2	12,8	12,5	12,2	11,9	11,6	11,7
Asie centrale et Asie du Sud	17,6	20,1	15,7	15,7	15,6	15,4	15,1	14,7	14,2
Asie centrale	15,7	14,2	10,6	9,9	9,1	8,4	8,2	8,2	8,4
Asie du Sud	17,7	20,4	15,9	15,9	15,9	15,7	15,3	14,9	14,4
Asie de l'Est et Asie du Sud-Est	16,6	15,2	11,6	10,9	10,4	9,9	9,6	9,2	9,7
Asie de l'Est	14,6	14,1	11,3	10,7	10,3	9,9	9,5	9,1	9,0
Asie du Sud-Est	22,0	18,1	12,4	11,3	10,7	10,0	9,7	9,4	11,5
Asie de l'Ouest	11,3	10,5	9,4	9,1	8,9	8,7	8,9	9,3	10,6
AMÉRIQUE LATINE ET CARAÏBES	12,0	9,1	6,8	6,6	6,4	6,3	6,3	6,3	6,6
Amérique latine	11,1	8,0	5,9	5,7	5,5	5,4	5,4	5,5	5,9
Amérique centrale	8,1	8,3	7,1	7,2	7,1	7,1	6,9	6,7	6,5
Amérique du Sud	12,2	7,9	5,4	5,1	4,8	4,7	4,8	5,0	5,6
Caraïbes	23,8	23,3	19,9	19,3	19,4	19,2	18,9	18,4	17,7
OCÉANIE	5,3	5,3	5,0	5,2	5,3	5,7	6,0	6,4	6,8
AMÉRIQUE DU NORD ET EUROPE	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5
<i>Autre groupe de pays:</i>									
Asie de l'Ouest et Afrique du Nord	9,3	8,7	7,6	7,3	8,7	8,5	8,6	8,8	9,5

Figure 4 : Prévalence de la sous-alimentation dans le monde de 2000 à 2016

Source : FAO

Définition de prévalence : Rapport du nombre de cas d'un trouble morbide à l'effectif total d'une population, sans distinction entre les cas nouveaux et les cas anciens, à un moment ou pendant une période donnée. (Dictionnaire Larousse)

Sur la figure 4, lorsque l'on compare la prévalence de la sous-alimentation, on retrouve encore une fois les trois principales régions dans le monde qui regroupent le plus de personnes sous-alimentées sont : l'Afrique, l'Asie et L'Amérique latine.



Légende : Comparaison de la prévalence et du nombre de personnes sous alimentées par région. La taille des cercles est proportionnelle au nombre de personnes sous alimentées indiqué à l'intérieur (en millions).

Figure 5 : Prévalence de la sous-alimentation en fonction du temps

Source : FAO

Ces graphes en figure 4 et en figure 5, nous montrent bien que les 3 régions atteintes de sous-alimentation sont bien l'Afrique, l'Asie et l'Amérique du sud.

En effet :

- 20% de la population africaine soit 243 millions de personnes souffrent de la faim

- 11.7% de la population asiatique soit 520 millions de personnes souffrent aussi de la faim
- 6.6% de la population de l'Amérique latine soit 42 millions en souffrent aussi.

En résumé, on peut surtout en déduire que la population touchée par la faim est essentiellement une population rurale vivant dans des pays en voie de développement.

Mais quelles sont les causes principales de cette sous-alimentation?

b) Causes de la sous-alimentation.

Plusieurs causes induisent la sous-alimentation mondiale, nous allons ici les énumérer brièvement.

1. La pauvreté

Définition CNLE (Conseil National des politiques de Lutte contre la pauvreté et l'Exclusion sociale) :

La pauvreté :

« Le terme de pauvreté est employé quotidiennement sans que sa définition ne fasse pour autant consensus. La difficulté à trouver une définition satisfaisante réside dans le fait que le concept de pauvreté est spécifique à une époque et à une société donnée.

La pauvreté est "l'état, la condition d'une personne qui manque de ressources, de moyens matériels pour mener une vie décente" (Trésor de la langue française).

Selon le Conseil européen de décembre 1984, sont considérées comme pauvres "les personnes dont les ressources (matérielles, culturelles et sociales) sont si faibles qu'elles sont exclues des modes de vie minimaux acceptables dans la société " . »

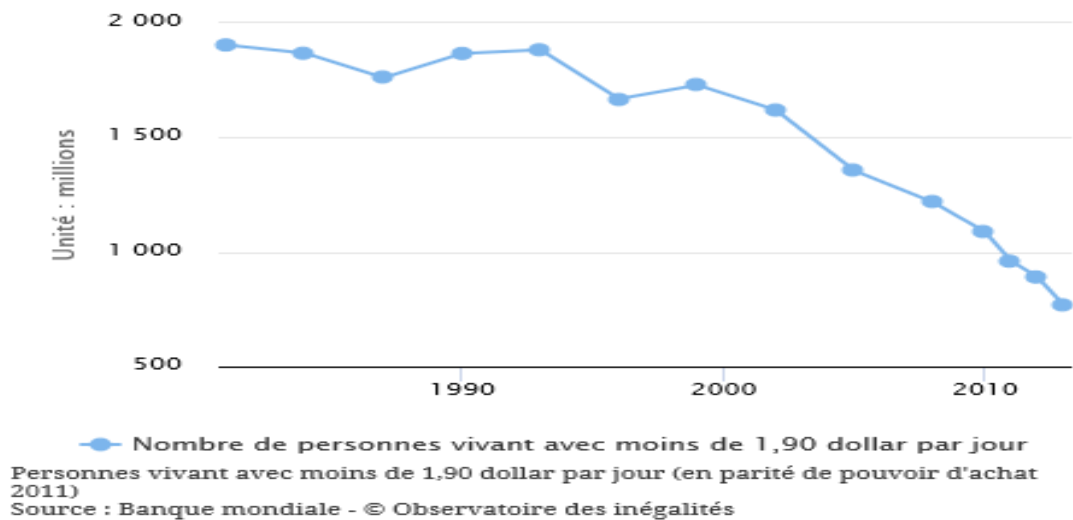
Définition Larousse :

Le seuil de pauvreté :

« Le seuil de pauvreté peut, quant à lui, être défini en termes relatifs (selon les minimaux acceptables, relatifs dans le temps et l'espace) ou absolus (par rapport à un montant minimum de ressources). Dans l'Union européenne, les individus ou foyers dont l'unité de consommation (personne seule, couple, famille) dispose d'un revenu inférieur au salaire médian ou au salaire moyen du pays (selon la définition choisie par le pays) vivent sous le seuil de pauvreté. »

La pauvreté est la principale cause de la faim dans le monde ; en effet, les populations pauvres ont des conditions de vie difficiles.

Elles sont sans ressources, n'ont pas d'accès aux soins médicaux, ni à l'éducation...



[Figure 6: Nombre de personnes très pauvres dans le monde](#)

Source : Banque mondiale

Selon la banque mondiale en 2013, on dénombrait environ 800 millions de personnes vivant en dessous de 1.90 dollar par jour, soit en extrême pauvreté.

D'après la figure 6 ce chiffre est à la baisse depuis ces dernières années mais il reste tout de même très important à l'échelle mondiale.

Qu'est-ce que la pauvreté extrême?

La pauvreté extrême : « Le seuil de pauvreté extrême est calculé sur la base du niveau de vie de 15 pays différents et est fixé par la Banque mondiale. Si une personne gagne moins que la somme prévue, alors son niveau de vie est insoutenable et on la considère comme "extrêmement pauvre". » (D'après l'article de Paolo Garoscio dans economiematin)

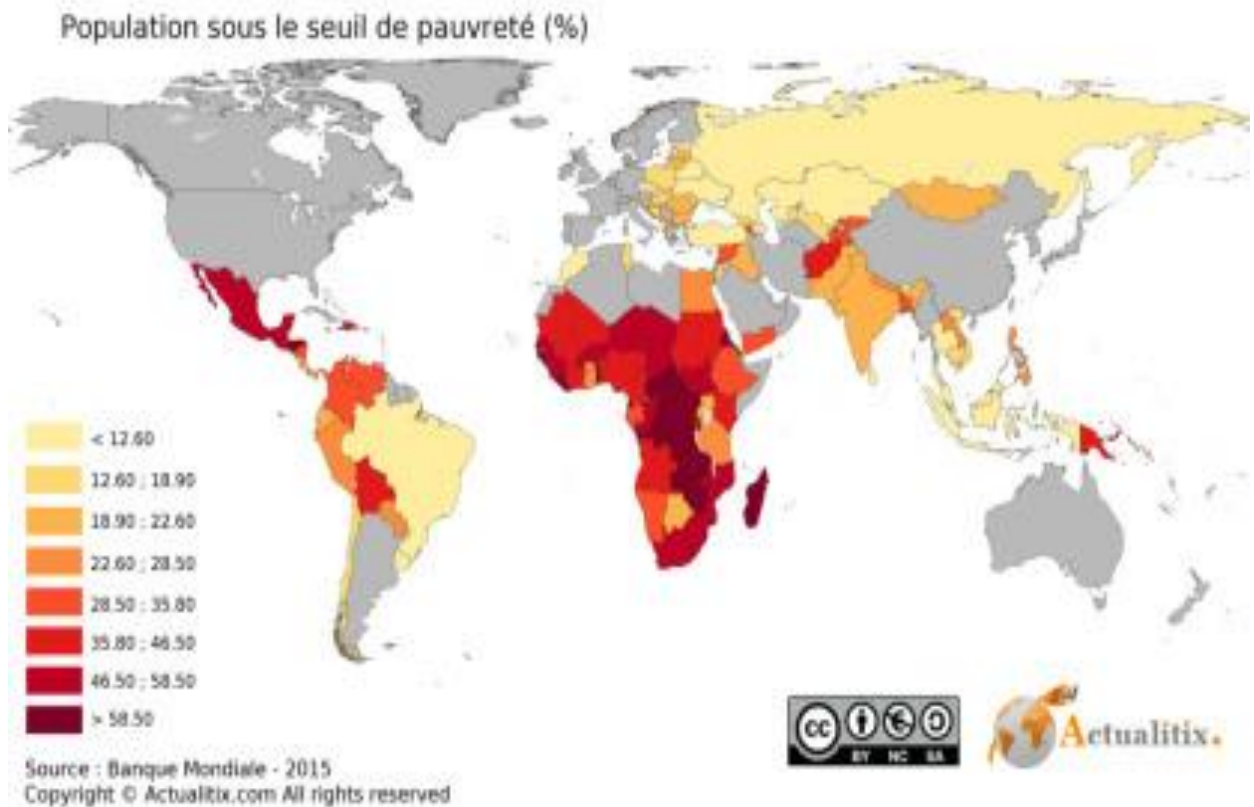


Figure 7: Population sous le seuil de pauvreté (en %)
Source : Banque mondiale 2015

On remarque sur cette carte en figure 7, qu'il existe plusieurs foyers de pauvreté : l'Amérique latine, l'Afrique et l'Asie.

Si l'on compare cette carte avec celle de la faim dans le monde présentée en figure 1, on observe que les pays les plus pauvres sont aussi les pays qui contiennent le plus de population sous-alimentée. Il existe néanmoins quelques exceptions tel que le Mexique.

2. Le problème d'accès à l'eau potable.

L'eau potable est une ressource essentielle tant pour l'alimentation que pour l'agriculture.

Cependant, il existe encore de nos jours des populations qui n'ont pas accès à l'eau potable.

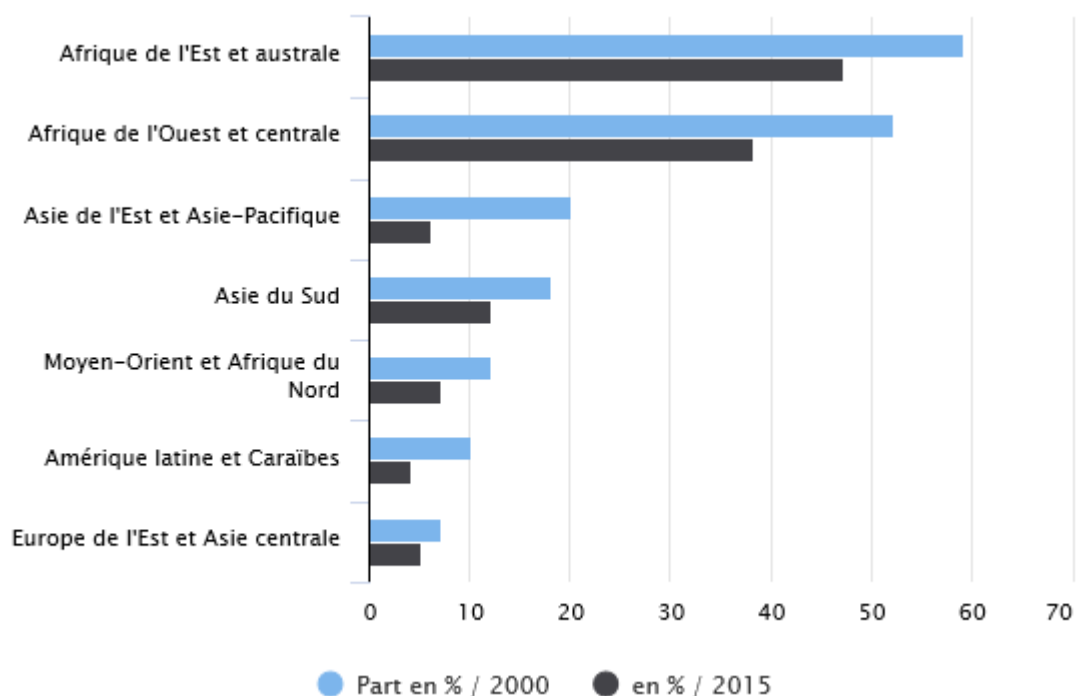


Figure 8: Population n'ayant pas accès à l'eau potable selon la région du monde

Source : OMS, Unicef. Données 2015

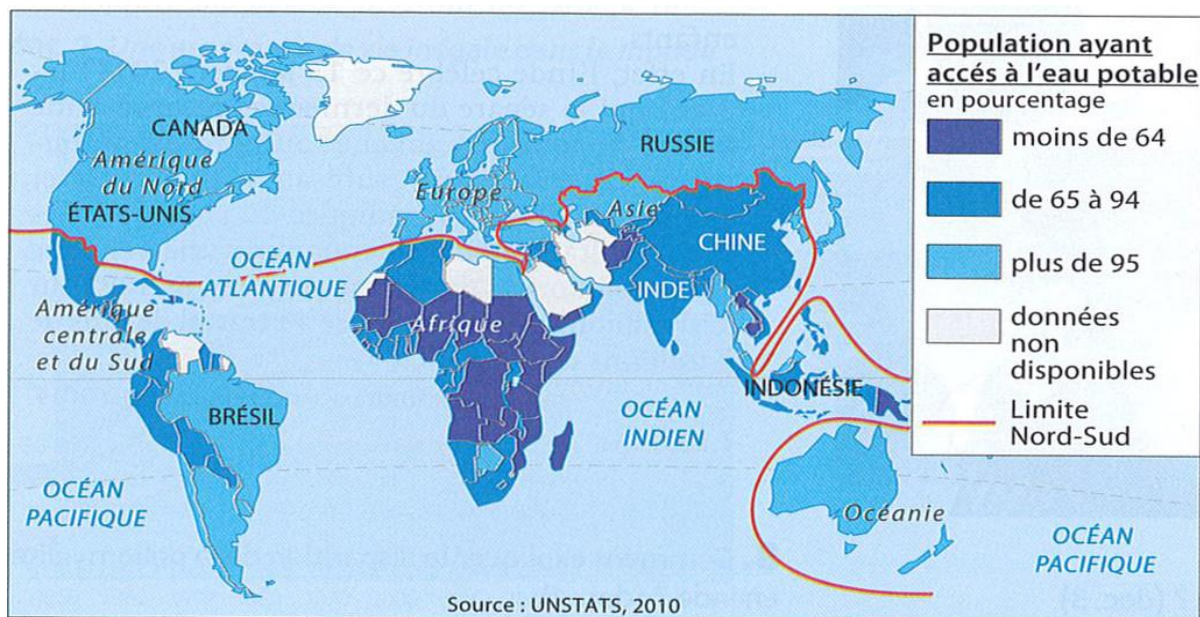


Figure 9: Carte du monde représentant la population n'ayant pas accès à l'eau potable

Source : UNSTATS, 2010

D'après ce graphique en figure 8 et la carte en figure 9, on remarque que les principales régions touchées par le manque d'accès à l'eau potable sont essentiellement :

- L'Afrique (dans sa globalité) avec environ 60% de sa population n'ayant pas accès.
- L'Asie avec environ 30% de sa population.
- L'Amérique latine avec un peu moins de 10% de sa population.
- L'Europe avec environ 5% de sa population

Selon le rapport des Nations Unis sur la Sécurité alimentaire de 2017 sur les progrès en matière d'assainissement et d'alimentation en eau : « 11% de la population mondiale, soit 844 millions d'individus, n'a pas accès à l'eau potable en 2015 ».

Si l'on compare avec les données décrites précédemment, ce sont donc surtout des populations pauvres vivants dans les pays en voie de développement qui n'ont pas accès à l'eau potable.

3. Le développement inégal de l'agriculture dans le monde

Il existe plusieurs inégalités au niveau de l'agriculture mondiale :

- Une inégalité de richesse : deux citations ci-dessous peuvent expliquer cette inégalité.

M. Marcel Mazoyer (ingénieur agronome et enseignant-chercheur français du corps des Eaux et Forêts (ENGREF Nancy, aujourd'hui intégrée dans AgroParisTech) souligne « (...) *les trois quarts des pauvres de la planète, qui sont tellement pauvres qu'ils en sont sous-alimentés, ne sont pas, contrairement à ce que l'on pourrait croire des consommateurs de produits agricoles et alimentaires, mais des producteurs de produits agricoles (...)* »

En effet selon l'étude présentée par Mme Hacquemand en 2008 sur la faim dans le monde : « (...) *Il ne suffit pas d'être producteur de denrées agricoles pour ne pas avoir faim. Ces petits paysans pauvres n'ont pas les moyens d'investir en semences, en engrais, ni en matériel agricole. Ils produisent donc peu, ce qui ne suffit pas toujours à l'alimentation de leur famille (...) un tiers des paysans du monde travaillent uniquement à la main, avec un outillage valant moins de cent dollars. Ces paysans n'ont pas davantage de moyens pour acheter des engrais, des semences sélectionnées ou des produits phytosanitaires, pour lutter contre les ravageurs de leur récolte. (...)* »

Ces deux études nous expliquent que la plupart des paysans pauvres ne peuvent produire des denrées que pour les revendre.

En effet, ils ne peuvent investir dans les engrais, les semences et le matériel agricole. Ils sont donc vulnérables face aux parasites, aux conditions climatiques...

Ils produisent donc peu et cela ne suffit pas toujours à nourrir leur famille.

- Une inégalité de qualité des sols :

Il existe aussi une inégalité de la qualité des sols, en effet l'homme détruit la plupart des sols agricoles par la pollution, la surproduction, l'industrialisation...

Citation de Philippe Rekacewicz dans le monde diplomatique :

« La population mondiale et la consommation individuelle augmentent... mais la nature n'accroît pas son offre au même rythme. Pour répondre à cette demande, l'agriculture s'est intensifiée dans les pays industrialisés endommageant considérablement l'environnement, notamment les sols. L'augmentation des besoins alimentaires mondiaux impose d'accroître la productivité. Mais elle doit préserver l'environnement, notamment par des systèmes « agricoles » moins industriels, et permettre l'essor de l'agriculture des pays en voie de développement, fortement entravée par la dégradation du milieu naturel. »

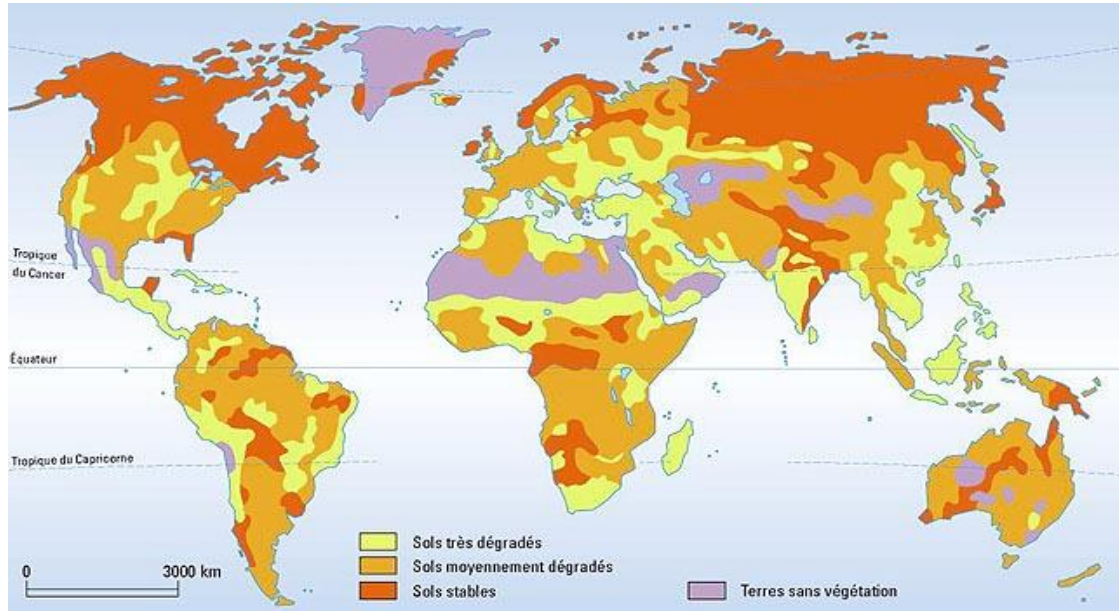


Figure 10 : Etat de dégradation des sols à l'échelle mondiale

Source : Institut des ressources mondiales ; Ressources mondiales, Editions Sciences et Culture, Montréal, 1992.

On peut voir sur la figure 10 que la quasi-totalité des sols du monde sont dégradés. En effet, selon la carte, il ne reste des sols stables (en rouge) que dans certaines parties de monde telles que le Canada et le nord de la Russie.

- Une inégalité de production.

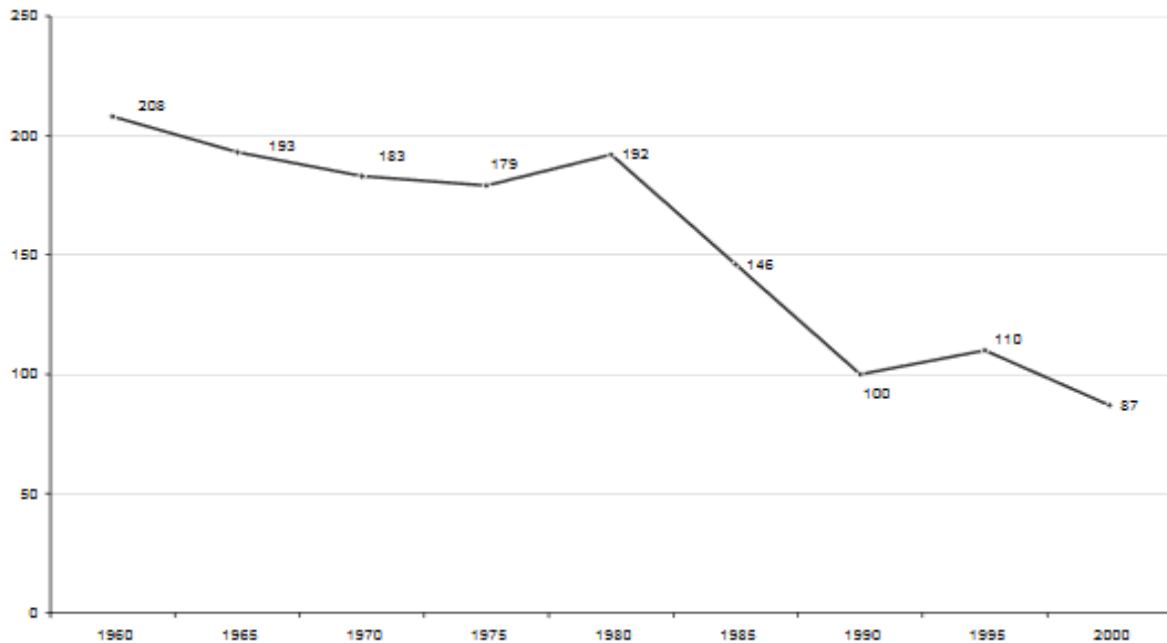


Figure 11: Evolution de l'indice des prix mondiaux des produits agricoles, alimentaires ou non, de 1960 à 2000 (base 100 pour 1990)

Source : d'après Banque mondiale (http://www.worldbank.org/data/wdi2001/pdfs/tab6_4.pdf)

Sur ce graphique en figure 11, on peut voir qu'en 40 ans que les prix mondiaux des produits agricoles et alimentaires ont diminué de plus de la moitié !

En effet la plupart des pays en développement, ne produisent qu'un seul produit agricole.

Cette unique production est donc très sensible aux conditions climatiques et au coût du marché.

La baisse des prix des produits agricoles a donc pour conséquence la baisse de productivité et donc de denrées pour les petits producteurs

- Une inégalité d'agriculture

Selon les pays, l'agriculture est inégale. En effet, on distingue tout d'abord l'agriculture vivrière qui permet à la population locale de se nourrir et l'agriculture commerciale qui est destinée à être vendue.

De plus, on peut distinguer aussi les productions agricoles à fort et à faible rendement.

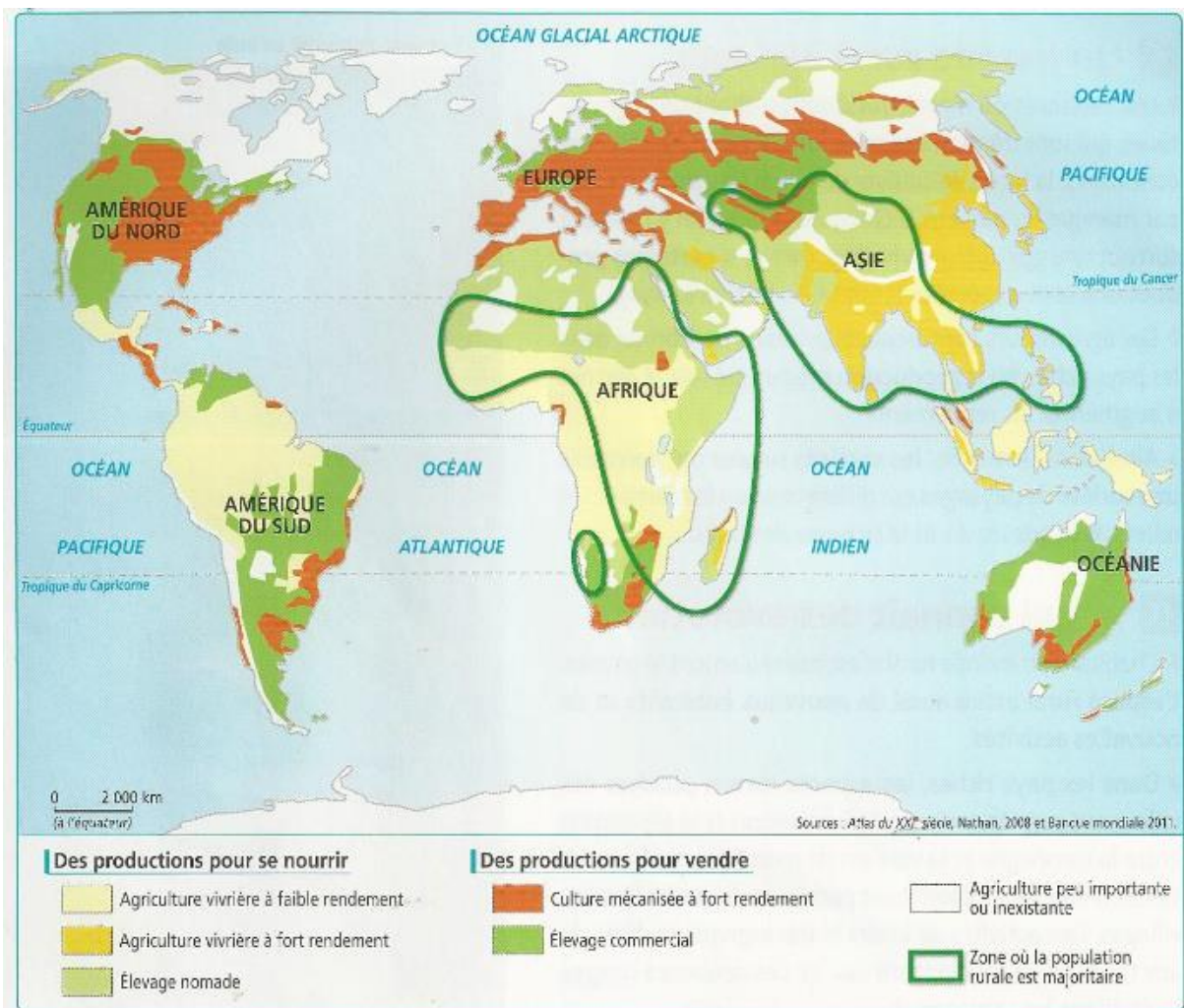


Figure 12: Les inégalités d'agricultures mondiales

Sources : Atlas du XXI^e siècle 2008 et banque mondiale 2011

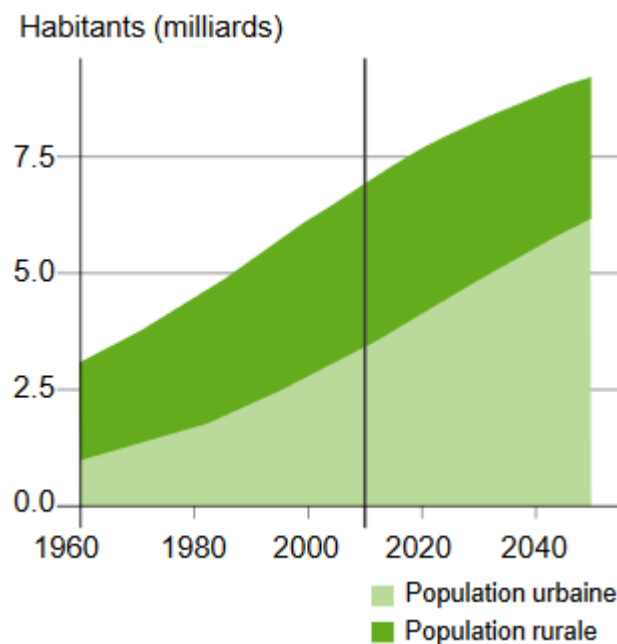
On peut voir sur cette carte que ce sont surtout les pays riches (comme en Europe et en Amérique du Nord) qui ont un fort rendement avec une agriculture moderne et mécanisée.

En effet, dans la plupart des pays en développement, l'agriculture reste traditionnelle avec des rendements faibles

4. Autres causes

On peut citer aussi d'autres causes qui jouent directement ou indirectement sur l'augmentation de la sous-alimentation mondiale :

- L'augmentation de la population mondiale qui est de plus en plus urbaine.



Remarque : Les données après 2011 sont des projections

[Figure 13: La population rurale et urbaine dans le monde de 1960 à 2050](#)

Source : United Nations Populations Division.

On remarque sur le graphique en figure 13 :

- En 1960, la population rurale est deux fois plus importante que la population urbaine.
- En 2011, les deux populations ont un nombre d'habitants équivalent. Il y a donc eu une augmentation plus importante de la population urbaine par rapport à la population rurale.
- En se projetant en 2050, on suppose que la population urbaine sera deux fois plus nombreuse que la population rurale.

La population va donc de plus en plus s'urbaniser au fil du temps. Ce qui va poser un problème sur la sous-alimentation ; en effet, cet excès d'urbanisation peut engendrer plusieurs phénomènes : la baisse du nombre des terrains agricoles, la fragilisation des sols, de la pollution, le pillage des ressources naturelles...

- **L'allongement de l'espérance de vie.**
- **L'augmentation de la consommation de viande.**

En effet, la production de viande nécessite d'importantes ressources agricoles. Pour produire 1kg de viande, il faut 7 à 10 kg de céréales et il faut 100 fois plus d'eau pour produire 1 kg de céréales.

Si l'on prend le cas du cheptel américain, celui-ci consomme plus de 7 fois la quantité de céréales consommées directement par l'ensemble de la population américaine. D'après The American Journal for Clinical Nutrition d'octobre 2013 : « La quantité de céréales utilisées pour nourrir le cheptel américain suffirait pour nourrir environ 840 millions de personnes suivant un régime végétarien. »

- **Le changement climatique induisant toutes ces catastrophes naturelles qui détruisent les cultures.**

Pour conclure ce chapitre, nous pouvons dire qu'aujourd'hui, il y a plus de 800 millions de personnes qui souffrent de sous-alimentation.

Ces personnes vivent essentiellement dans des pays en voie de développement situés en Afrique, Asie et Amérique du sud.

Plusieurs causes provoquent la sous-alimentation de la population mondiale (pauvreté, problème d'accès à l'eau...) mais un autre problème moins connu cause aussi la destruction de nombreuses cultures dans différentes régions du monde, il s'agit de parasites phytopathogènes : **Les nématodes phytoparasites** . Ce sont eux que nous allons aborder dans le prochain chapitre.

CHAPITRE II

Les nématodes parasites de plantes

II) Les nématodes parasites de plantes.

a) Description et classification des nématodes.

1. Généralités sur les nématodes

Les nématodes, en général, sont des organismes vermiformes cylindriques constitués d'un corps longitudinal non segmenté.

Ils occupent des niches écologiques très diverses ; en effet, on les trouve dans les différents types de sols, dans les eaux salées ou non etc.

Ils peuvent exister aussi sous forme libre ou sous forme parasite d'animaux et de végétaux.

Ce sont des animaux aquatiques avec une morphologie commune homogène. Il est difficile de distinguer les différentes espèces ou même genres et familles sans expérience et le plus souvent sans un microscope.

Le nombre total estimé aujourd'hui se situe entre 40 000 et plusieurs millions d'espèces (Blaxter et al., 1998; Dorris et al., 1999 ; Blumenthal et al., 2004), ce qui les classe au 2^{ème} rang du règne animal après les insectes.

On sait aussi qu'environ 15% des espèces sont des parasites de plantes.

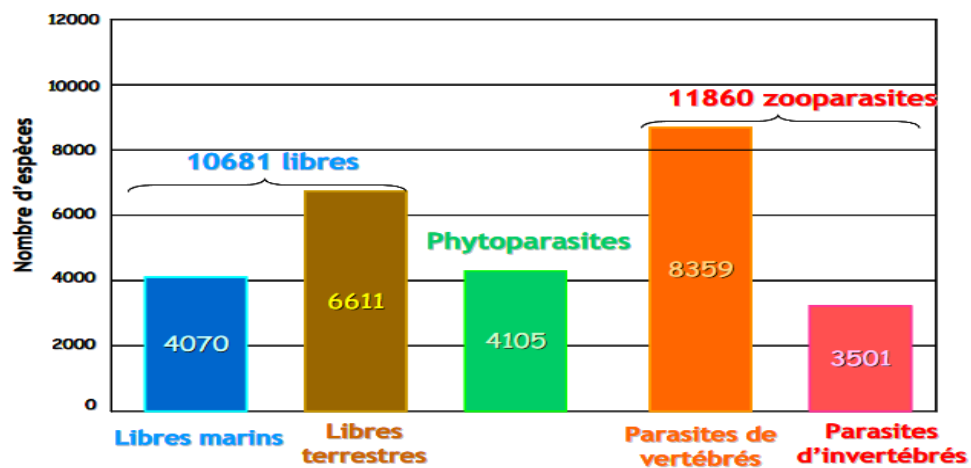


Figure 14 Mode de vie des différentes espèces de nématodes.

Source : IDENTIFICATION, POLYMORPHISME ET EVOLUTION MOLECULAIRE DE GENES DU POUVOIR PATHOGENE CHEZ LE NEMATODE A KYSTE DE LA POMME DE TERRE GLOBODERA PALLIDA, d'Alexandra BLANCHARD. D'après Hugot et al., 2001

2. Classification des nématodes

Le phylum des nématodes est l'un des plus grands du règne animal. En effet , aujourd'hui environ 27 000 espèces sont décrites à ce jour.

Règne : Animal

- Sous-règne : Bilatéralien (ont une symétrie bilatérale)
 - Infra-règne : Protostomien (la bouche se forme à partir du blastopore)
 - Super-embranchement : Ecdysozoaires (animaux capables de renouveler leur cuticule par des mues)
 - Phylum : Nématodes

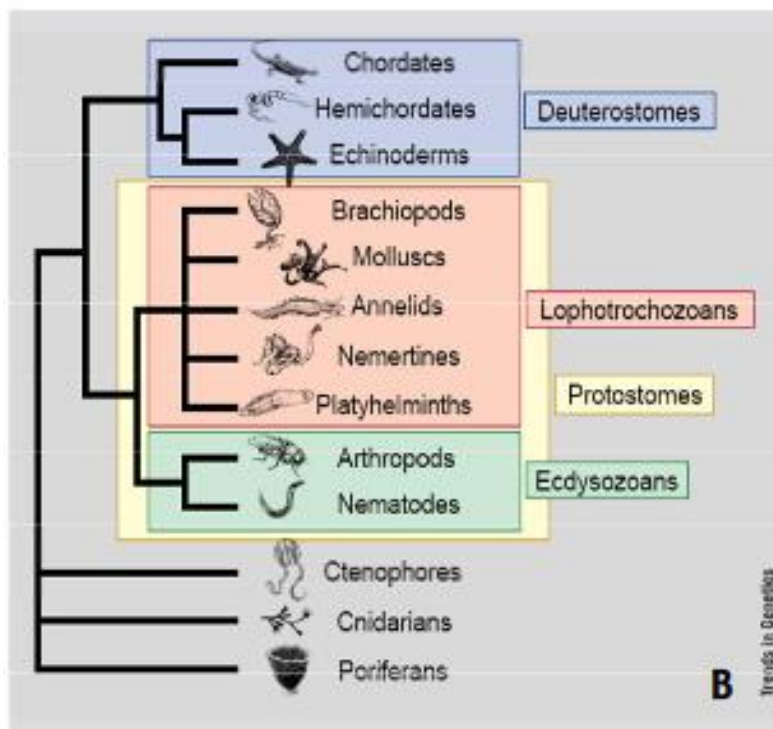


Figure 15: Phylogénie des métazoaires basée sur les séquences 18S de l'ARN ribosomal.

Source : Adoutte et al. 1999

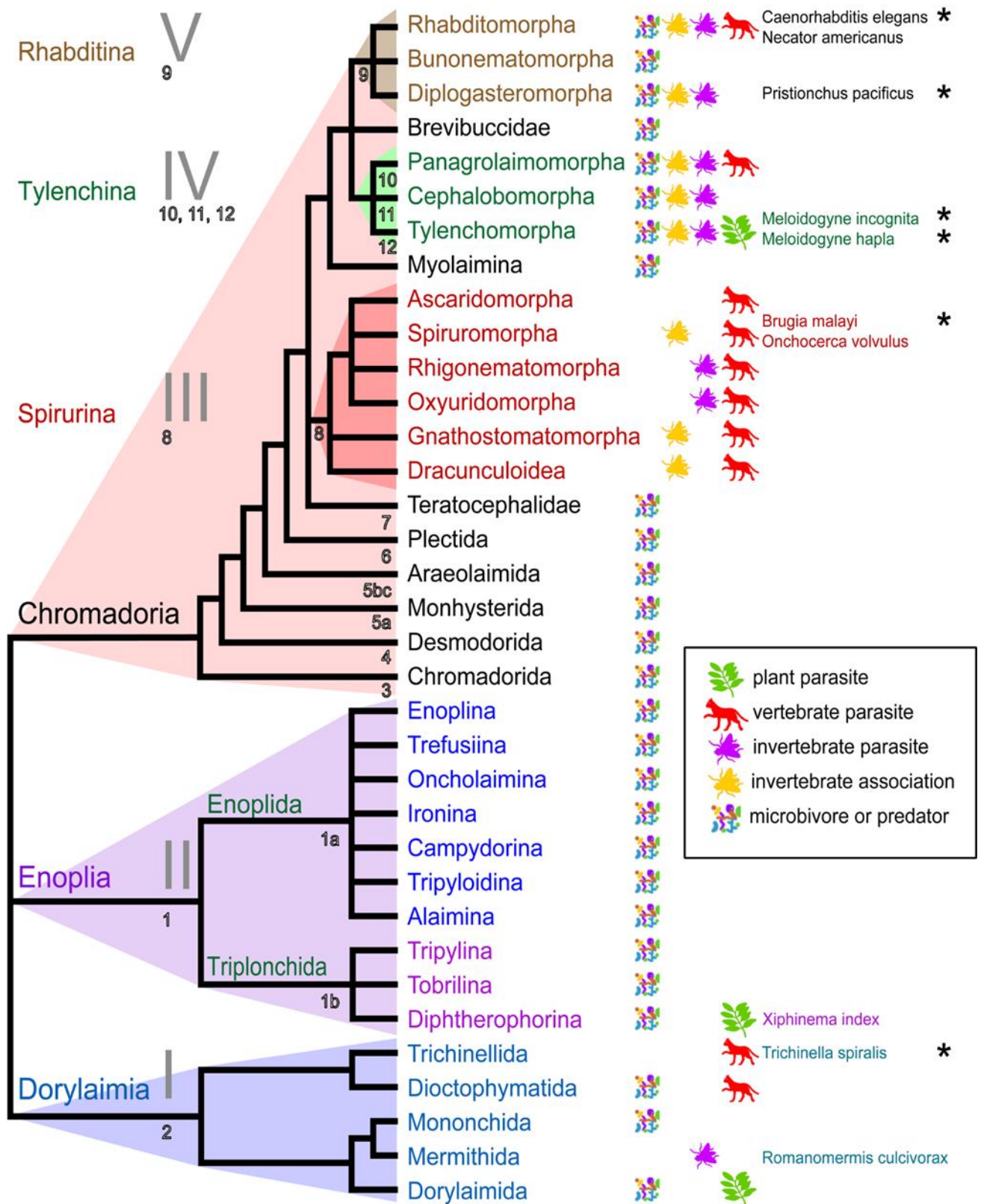


Figure 16: Phylogénie du phylum des nématodes.

Source : <https://journals.plos.or>

Les nématodes sont répartis dans deux classes différentes contenant 5 clades majeurs:

- La classe des Adenophorea comprenant les clades I et II
- La classe des Secernantea comprenant les clades III, IV et V

Chaque clade contient des espèces ayant des modes de vie divers. En effet, les nématodes peuvent être bactériophages (se nourrissent à partir des bactéries), mycophages (se nourrissent à partir des champignons), saprophages (se nourrissent à partir de matières organiques), prédateurs d'autres organismes du sol, zooparasites (parasite ayant pour hôte un animal) et phytoparasites (parasite ayant pour hôte un végétal).

Il y a 3000 espèces de nématodes phytopathogènes qui se répartissent dans 3 clades (I, II et IVb) et qui se séparent dans 4 ordres différents (d'après Blaxter et al., 1998)

- Les Dorylaimida
- Les Triplonchida
- Les Aphelenchida
- Les Tylenchida

On peut les distinguer par leurs lieux de parasitisme sur les végétaux : les Aphelenchida parasitent les parties aériennes, les Dorylaimida et les Tylenchida parasitent les racines et les Triplonchida parasitent les racines, tubercules et rhizomes.

Les Dorylaimida et les Triplonchida sont aussi vecteurs de virus qui détruisent les cultures de plantes.

L'ordre le plus important et provoquant le plus de dégâts sur les végétaux est celui des Tylenchida. En effet, il est composé de 9 familles dont les plus importantes sont celle des Heteroderidae qui contient les nématodes à kystes et celle des Meloidogynae qui contient les nématodes à galles que nous allons décrire maintenant.

3. Description morphologique des nématodes phytopathogènes.

Les nématodes phytopathogènes sont des organismes vermiformes avec une symétrie bilatérale.

Ce sont des vers microscopiques, de forme ronde et allongée, mesurant environ 0.3 mm à 0.5 mm de longueur et d'environ 0.4 mm de diamètre.

Ils sont dépourvus de membre et de squelette et ont la forme d'un fuseau. Ils ne peuvent être vu à l'œil nu, mais sont observables à la loupe binoculaire ou au microscope.

Leur corps est entouré d'une cuticule souple et continue.

Ils sont constitués de 75% d'eau et leur tube digestif est constitué d'un œsophage, d'un intestin et d'un anus situé à la base de la queue.

Ils sont dépourvus de systèmes circulatoire et respiratoire, cependant ils ont une musculature qui les entoure de la bouche à l'anus qui leur permet de se mouvoir.

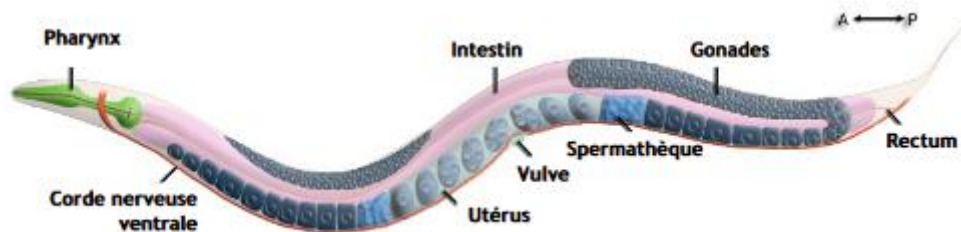


Figure 17: Anatomie générale d'un nématode

Source : Structure d'un nématode (d'après by Z. F. Altun & D. H. Hall, dans Atlas of *C. elegans* anatomy, <http://www.wormatlas.org/handbook/contents.htm>).

Chez les nématodes phytopathogènes, on observe un caractère commun au niveau de leur bouche, c'est ce que l'on appelle le stylet. Il s'agit d'un organe creux qui ressemble fortement à une aiguille hypodermique.

Ce stylet leur sert à perforer les cellules végétales, à y injecter des enzymes lytiques afin d'en extraire la sève végétale.

Les nématodes peuvent ainsi se nourrir grâce à lui en perforant les parois cellulaires des plantes et en aspirant le contenu des cellules.

L'aspiration est possible grâce au bulbe médian qui est un organe musculueux agissant comme une pompe.

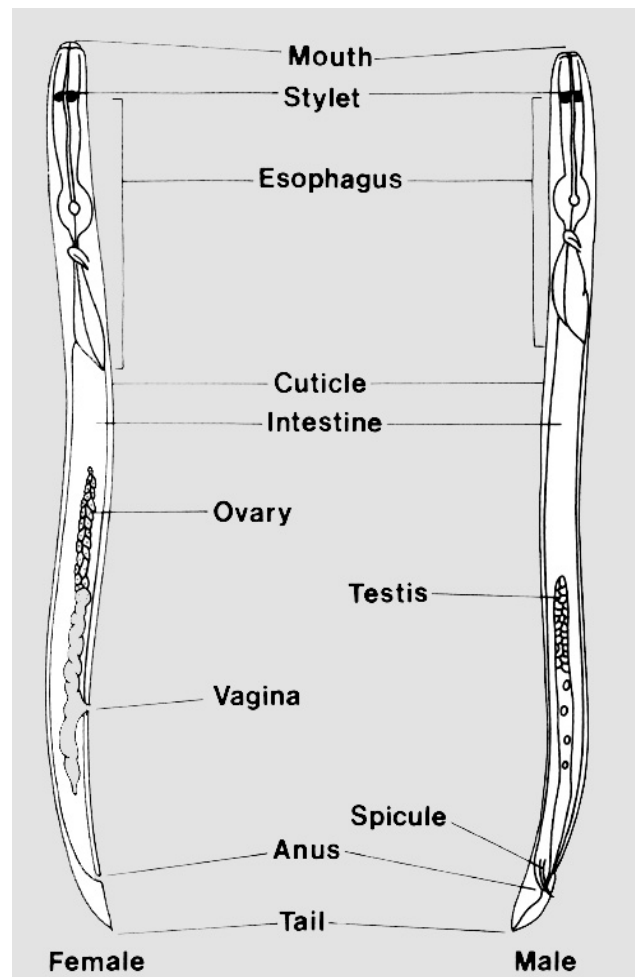


Figure 18 : Schéma de comparatif de nématodes phytopathogènes, femelle et mâle.

Source : www.apsnet.org/edcenter/intropp/PathogenGroups/Pages/IntroNematodes.aspx

En fonction de la stratégie parasitaire du nématode c'est-à-dire ectoparasite , endoparasite ou ecto-endoparasite , le stylet pourra avoir une forme et une longueur différente. Nous reviendrons en détail sur ce point dans un autre paragraphe.

4. Modes de reproduction chez les nématodes phytoparasites (d'après Weischer & Brown, 2000)

On retrouve différents modes de reproduction chez les nématodes phytoparasites qui sont :

- La reproduction amphimictique: mode de reproduction sexuée qui implique la fusion d'un gamète mâle et d'un gamète femelle haploïde.
- La reproduction parthénogénétique : mode de reproduction asexuée, qui ne nécessite pas l'intervention des spermatozoïdes du mâle (pas de fécondation). Il existe 2 types de parthénogenèse :
 - La parthénogenèse méiotique où la descendance n'est pas génétiquement identique à la mère (recombinaison après méiose)
 - La parthénogenèse mitotique où tous les descendants sont génétiquement identiques à leur mère (reproduction clonale).
- L'hermaphrodisme : cas particulier de la reproduction bisexuelle. Un nématode hermaphrodite est auto-fertile, il produit des spermatozoïdes et des ovules en une seule gonade. Les spermatozoïdes sont d'abord produits et stockés pour fertiliser les gamètes qui sont produits par la suite

Plusieurs modes de reproduction peuvent être rencontrés même au sein d'un même genre.

Espèce	Cycle de vie	Fécondité (nombre d'œufs)	Mode de reproduction
<i>Ditylenchus dipsaci</i>	70 jours	500	amphimixie
<i>Heterodera schachtii</i>	30 jours	400	amphimixie
<i>Meloidogyne hapla</i>	30 jours	500	amphimixie/parthénogenèse
<i>Meloidogyne javanica</i>	30 jours	500-1000	parthénogenèse (mitotique)
<i>Paratrichodorus minor</i>	16 jours	57-86	hermaphodisme
<i>Xiphinema diversicaudatum</i>	1.2 an	200	amphimixie
* <i>Pratylenchus brachyurus</i>	5-10 jours	30-40	parthénogenèse mitotique
<i>Pratylenchus coffeae</i>	27 jours		amphimixie
<i>Pratylenchus neglectus</i>	28 jours		parthénogenèse mitotique
* <i>Pratylenchus penetrans</i>	30-86 jours		amphimixie
<i>Pratylenchus scribneri</i>	29 jours		parthénogenèse méiotique

* : la durée de cycle de vie de ces espèces de *Pratylenchus* est variable selon la tempér

Figure 19: Exemples de durée du cycle de vie, de fécondité et de modes de reproduction chez quelques espèces de nématodes phytoparasites.

Source : <https://fr.scribd.com/document/332448715/These-Nadine-Ali>

Dans le tableau en figure 29, on peut voir que chez les nématodes phytopathogènes, on retrouve une grande diversité en fonction des espèces sur leur durée de vie, le nombre d'œufs qu'ils fécondent et sur leur mode de reproduction.

5. Relation des nématodes phytopathogènes avec le milieu.

Ce sont des animaux aquatiques aérobies c'est-à-dire qu'ils vivent et respirent dans un film d'eau. Comme ils sont dépourvus de système respiratoire, la respiration se fait par diffusion au travers de pores qui percent la cuticule imperméable.

Ils se déplacent dans le sol en ondulant grâce à leurs muscles longitudinaux.

Ils sont surtout présents dans les couches superficielles du sol , mais peuvent également se trouver dans des zones profondes (cas des espèces ligneuses).

La température, le pH, le type de sol... va influencer le développement de tel ou tel type d'espèce de nématode et sa reproduction.

En effet, certains ne survivent pas à une inondation alors que certains se développent dans des rizières, d'autres préfèrent des sols sableux...alors que d'autres préfèrent les sols plutôt argileux.

6. Cycle de vie des nématodes phytopathogènes à galles et à kyste.

Dans ce chapitre, nous allons décrire tout d'abord le cycle de vie des nématodes à galles et ensuite celui des nématodes à kystes.

Généralités :

Le cycle de vie des nématodes se déroule en deux phases :

- Une phase exophyte qui se déroule dans le milieu extérieur de la plante à la ponte à la pénétration des larves dans la racine.
- Une phase endophyte qui se déroule dans l'hôte et qui permet le développement et la reproduction du nématode.

Avant d'atteindre l'âge adulte, les larves subissent 4 mues successives.

Cycle de vie des nématodes à galles, endoparasites sédentaires (figures 20 et 21) :

Phase exophyte :

- Le stade larvaire L1 se développe dans l'œuf. La larve effectue sa première mue et détruit l'œuf dans lequel elle se situe.

Une larve de stade L2 va donc être libérée.

- La larve L2 est la forme libre qui se dissémine dans le milieu extérieur.

Elle est attirée vers les racines par chimiotactisme.

Phase endophyte :

- Elle pénètre ensuite dans la racine, migre entre les cellules vers l'apex racinaire.

Une fois le cylindre central atteint, elle formera un site nourricier, que l'on nomme cellule géante.

Cette cellule géante va permettre à la larve de se nourrir sans se déplacer.

Cette cellule augmente de volume, et elle étire de ce fait les cellules corticales qui s'y annexent. Cela forme ce que l'on appelle une galle.

Dans cette galle, la larve L2 perd ses muscles locomoteurs et grossit.

- Elle effectue ensuite 3 mues successives (L3 et L4).

C'est à ce stade qu'elle perd son stylet (cas des endoparasites sédentaires), le nématode se différencie sexuellement et atteint l'âge adulte

- Les mâles ne se nourrissent pas, quittent les tissus de l'hôte, et ne vivent que quelques semaines.

Les femelles sédentaires continuent à s'alimenter à partir des cellules géantes durant plusieurs semaines, elles augmentent de volume et pondent à l'extérieur de la racine de 300 à 1000 œufs.

- Enfin elles meurent et les cellules géantes dégénèrent.

Certains œufs éclosent directement et évoluent en larves. D'autres peuvent passer sous une forme de résistance et survivre jusqu'à 5 à 6 ans dans le sol.

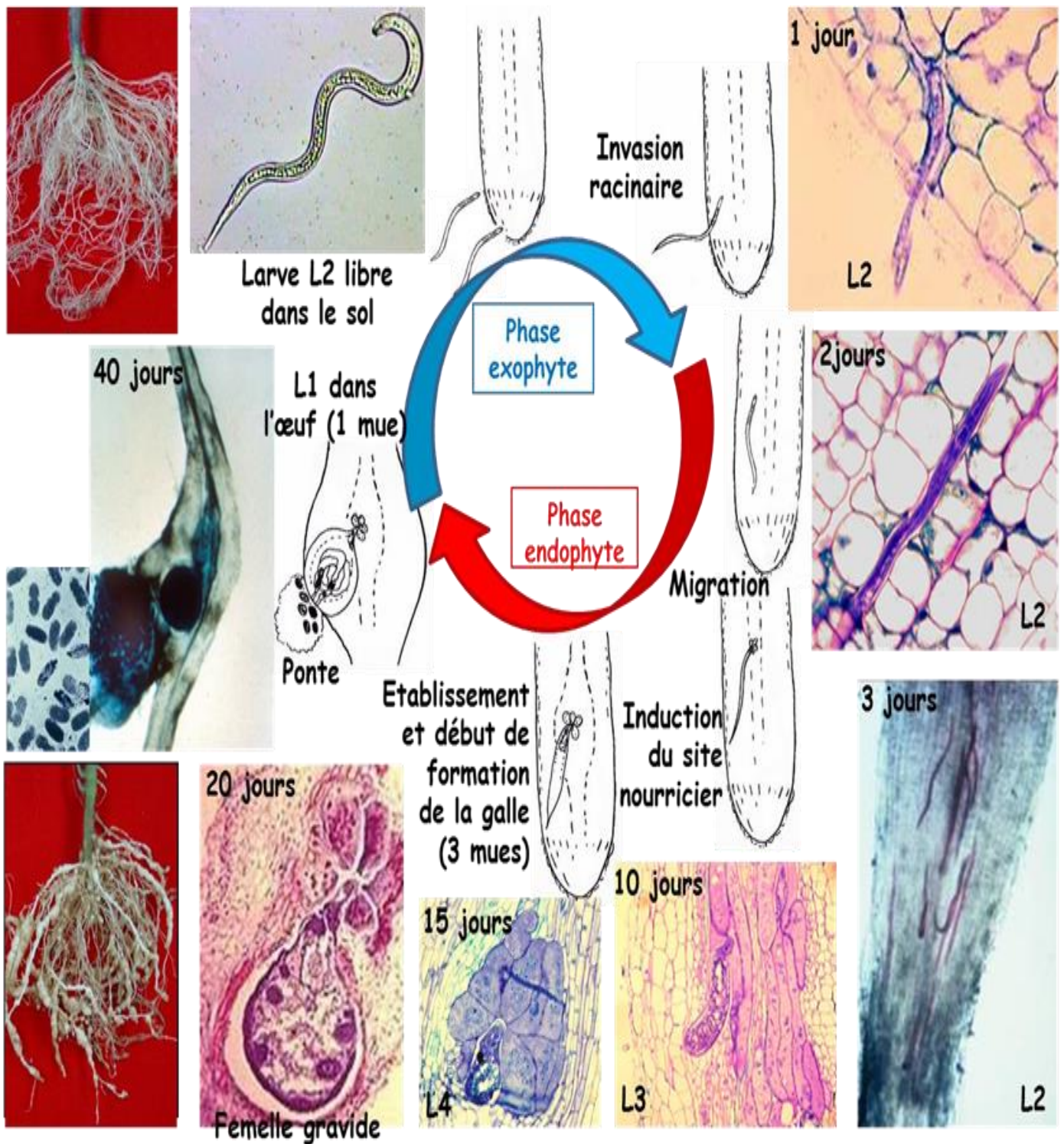


Figure 20: Cycle de développement des nématodes à galles

Source : INNOVATIONS TECHNIQUES ET VARIETALES POUR UNE GESTION DURABLE ET INTEGREE DES NÉMATODES A GALLES DANS LES SYSTEMES MARAICHERS SOUS ABRIS de Caroline Djian-Caporalino. Photos INRA Sophia Antipolis

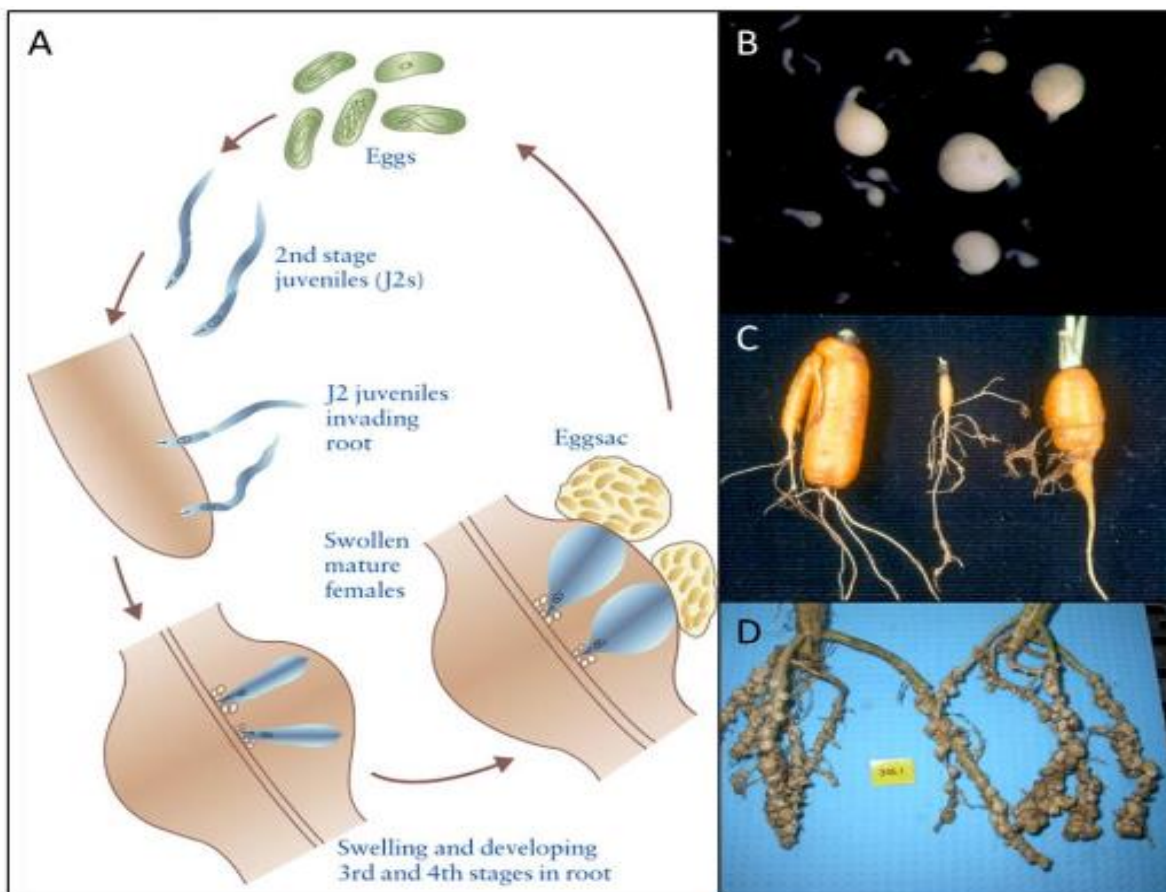


Figure 21: Cycle biologique schématique d'un endoparasite sédentaire à galles (d'après Bridge and Starr (2007)) et exemples (photographies au microscope optique) (crédits: ANSES, LSV)

A: Le stade larvaire L1 à lieu dans l'œuf et n'apparaît donc pas. B: Femelles renflées de *Meloidogyne* sp. C et D: Déformations de racines, respectivement, de carottes et de melons dues aux nématodes du genre *Meloidogyne*.

Source : Analyse exploratoire des variables structurant la capacité des communautés de nématodes phytoparasites à limiter l'implantation du nématode de quarantaine *Meloidogyne chitwoodi*. De Nathan GARCIA

Cycle de vie des nématodes à kystes, endoparasites sédentaires (figure 22) :

Phase Exophyte :

- Le stade larvaire L1 se développe dans l'œuf. La larve effectue sa première mue et détruit l'œuf dans lequel elle se situe.

Une larve de stade L2 va donc être libérée.

- La larve L2 est la forme libre qui se dissémine dans le milieu extérieur. Elle est attirée vers les racines par chimiotactisme.

Phase Endophyte :

- Elle pénètre ensuite dans la racine, migre entre les cellules vers l'apex racinaire.

Il y a alors formation d'un site nourricier. Ce site nourricier entraîne une rupture partielle de la membrane cellulaire en grossissant.

Il forme alors un syncytium avec les cellules voisines.

- Ce syncytium va s'étendre longitudinalement pour permettre à la larve de passer ces différents stades larvaires (mues) jusqu'au stade adulte.

- Une fois au stade adulte, les mâles sortent dans le milieu extérieur alors que les femelles pondent à l'extérieur ou à l'intérieur du syncytium.

- A la mort de la femelle, la cuticule du syncytium se durcit et brunit pour former ce que l'on appelle un kyste.

Le kyste est une forme de protection très efficace pour les œufs.

En effet, il peut contenir plusieurs centaines d'œufs et cela pendant plusieurs années

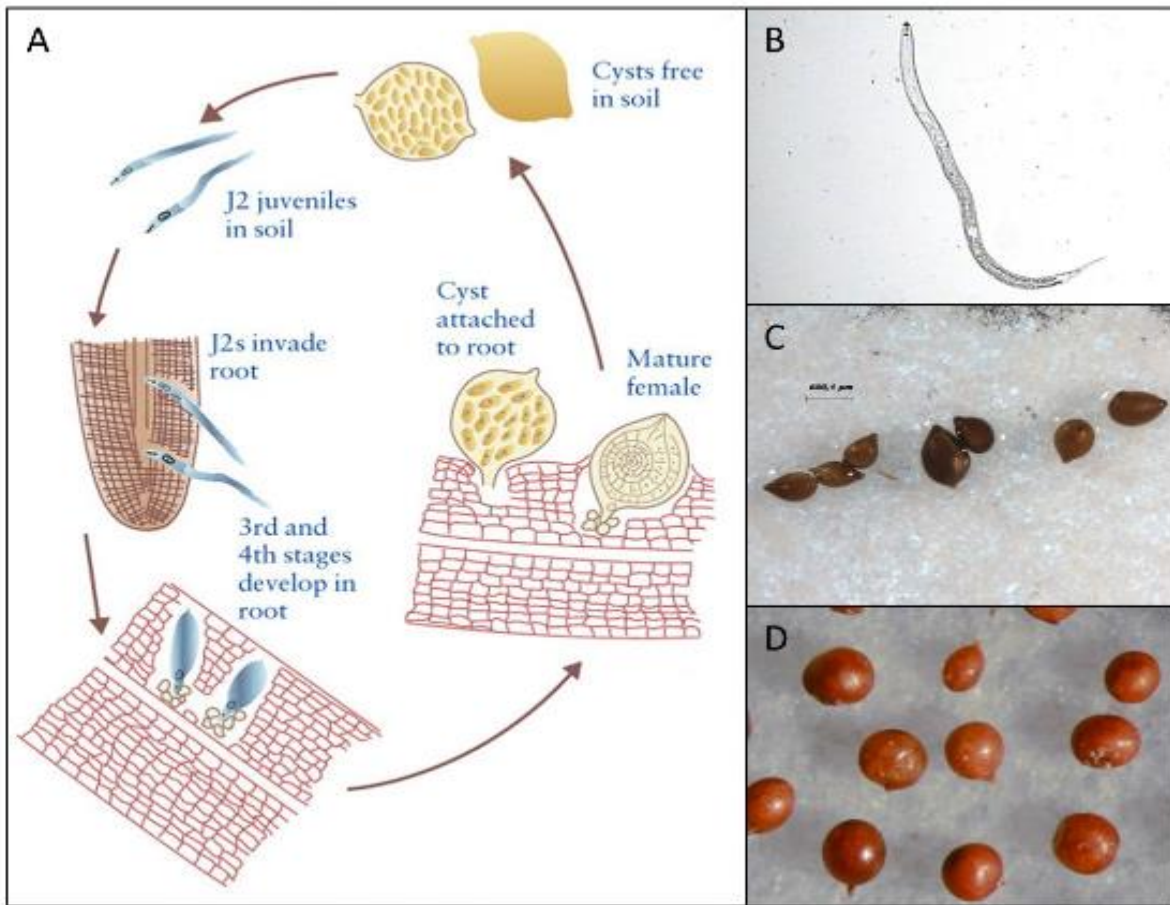


Figure 22 : Cycle biologique schématique d'un endoparasite sédentaire à kyste (d'après Bridge and Starr (2007)) et exemples (photographies au microscope optique) (crédits: ANSES, LSV)

A: Le stade larvaire L1 à lieu dans l'œuf et n'apparaît donc pas. B: Larve d'*Heterodera*. C: Femelles *Heterodera* sp. enkystées. D: Femelles *Globodera* sp. enkystées.

Source : Analyse exploratoire des variables structurant la capacité des communautés de nématodes phytoparasites à limiter l'implantation du nématode de quarantaine *Meloidogyne chitwoodi*. De Nathan GARCIA

La différence entre ces deux types de nématodes est la présence de kystes (figure 23 et 24) ou de galles (figure 25 et 26).

Ces deux formes peuvent être facilement observées et différenciées à l'œil nu.

Photos de kystes

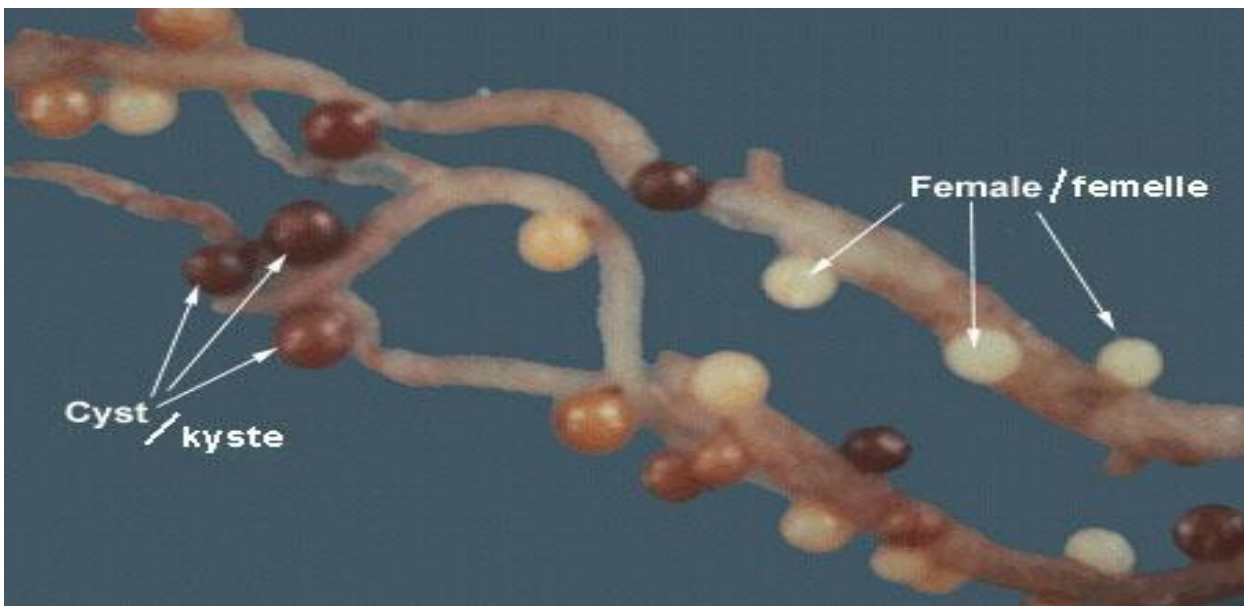


Figure 23: Photo de nématodes femelles et de kystes

Source : Dr A. Morgan Golden, USDA, Beltsville, MD



Figure 24: Photo de kystes sur des racines

Source : Agriculture & Agroalimentaire Canada, Direction générale de la recherche

Photos de Galles :



Figure 25: Photo de galles sur une racine de salade

Source : Gerald Holmes, California Polytechnic State University at San Luis Obispo, Bugwood.org



Figure 26: Photo de galles sur des racines de tomates



Figure 27: Photo de carottes infestées par des nématodes

Source (figure 26) : <http://ephytia.inra.fr/fr/C/5275/Tomate-Principaux-symptomes>

Source (figure 27) : http://www.nematodes.be/_library/_files/definitie_melo7.jpg

b) Les différents modes de parasitismes des Nématodes.

On peut diviser les nématodes phytoparasites en plusieurs groupes en fonction de leur mode de parasitisme.

En effet, on retrouve des ectoparasites, des ecto-endoparasites, des endoparasites sédentaires et migrants.

1. Les ectoparasites (figure 28) :

Ils ne pénètrent jamais entièrement dans les racines, il n'y a que le stylet qui traverse les cellules se trouvant à la périphérie des racines.

Tous les stades larvaires et adultes peuvent être parasites des racines.

Ils ont pour cela un stylet long qui leur permettra de se nourrir dans les cellules les plus au centre de la racine.

Quelques exemples de genre : les *Trichodorus*, les *Longidorus* et les *Xiphinema*

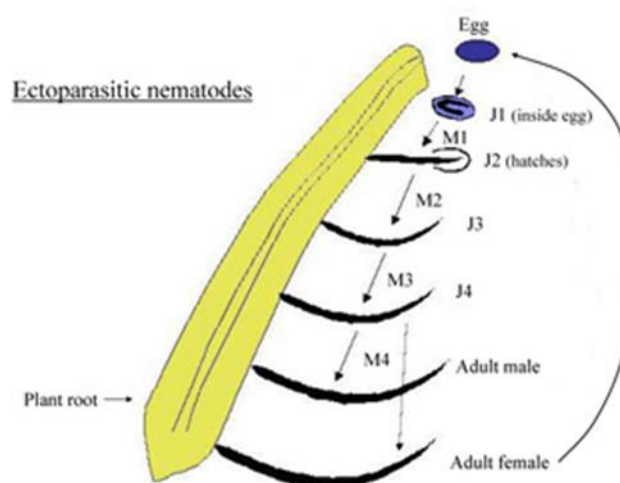


Figure 28 : Coupe longitudinale d'une racine parasitée par des nématodes ectoparasites

Source : www.apsnet.org

2. Les endoparasites migrants (figure 29):

Ils pénètrent dans la racine et peuvent en ressortir pour migrer vers une autre.

Ces nématodes passent la plus grande partie de leur vie dans la racine. Ils vont pouvoir s'y mouvoir et se reproduire.

Cependant, les œufs pourront être pondus dans la racine comme dans le milieu extérieur.

Les cellules attaquées nécrosent et forment des lésions racinaires. Une fois la racine trop nécrosée, les nématodes la quittent et migrent vers une racine plus saine.

Ici nous pouvons prendre l'exemple du genre des *Pratylenchus* spp

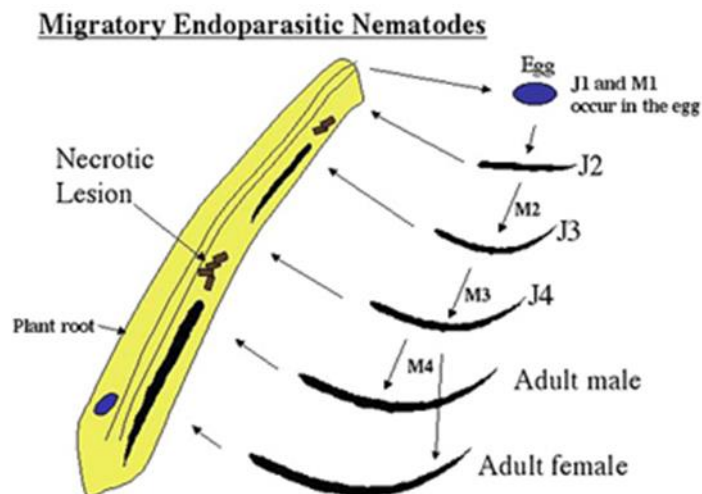


Figure 29: Coupe longitudinale d'une racine parasitée par des nématodes endoparasites migrants

Source : www.apsnet.org

3. Les endoparasites sédentaires (figure 30) :

Dans ce cas nous parlons des nématodes à galles et à kystes (décrits dans le paragraphe : « II- a)- 6. Cycle de vie des nématodes phytopathogènes à galles et à kyste. »

Ici les nématodes pénètrent la racine, s'y fixent et ne la quittent plus.

Nous décrivons plus précisément ce type de lésions plus tard dans le paragraphe : « II- d) Symptômes et impacts qu'ils produisent sur les plantes. »

Les genres les plus retrouvés sont les nématodes appartenant aux genres *Meloidogyne* (nématodes à galles), et au genre *Heterodera* (nématodes à kystes)

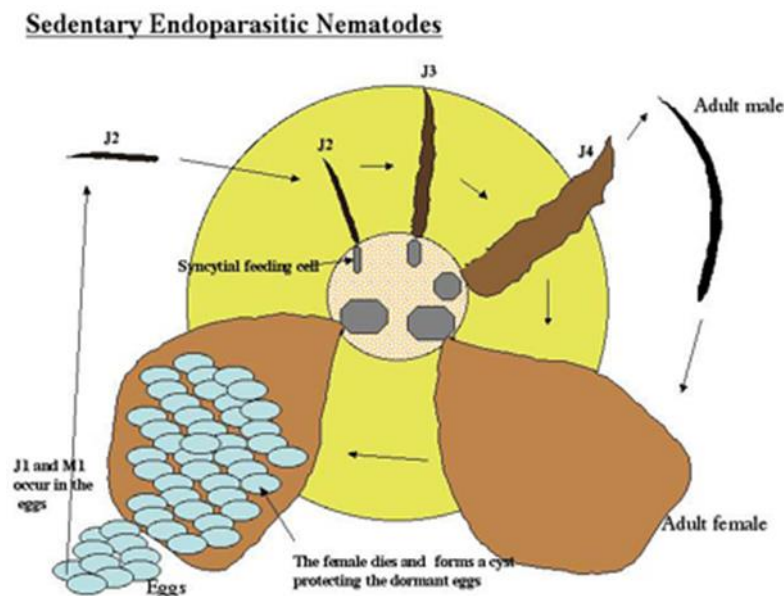


Figure 30: Coupe transversale d'une racine parasitée par des nématodes endoparasites sédentaires

Source : www.apsnet.org

4. Les semi-endoparasites (figure 31) :

Dans ce cas, les nématodes se fixent en un point : seule la partie antérieure pénètre dans la racine, le reste du corps se trouve à l'extérieur de la plante.

Ils ont un cycle de vie et provoque des lésions identiques aux nématodes ectoparasites.

Les genres que l'on peut citer dans ce cas sont les genre *Helicotylenchus* et *Telotylenchidae*

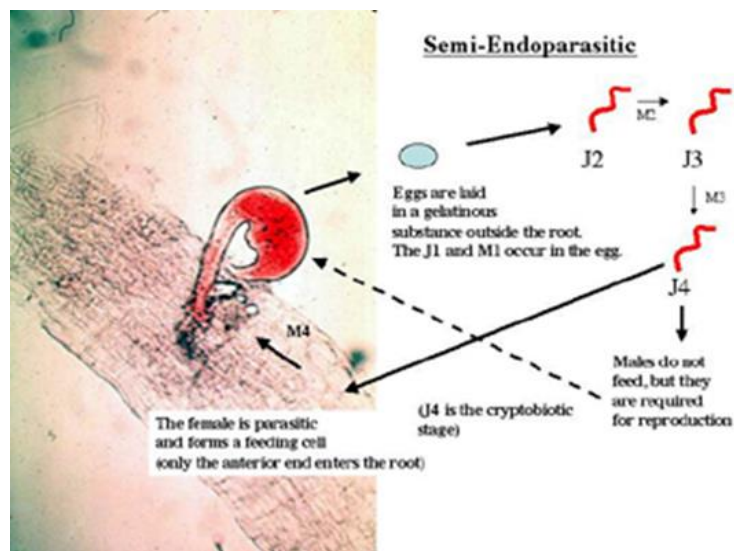


Figure 31: Schéma du cycle de vie des nématodes ecto-endoparasites

Source : www.apsnet.org

Traduction des légendes

- Les œufs sont pondus dans une substance gélatineuse en dehors de la racine.
- Les mâles ne se nourrissent pas, ils ne servent qu'à la reproduction.
- Seules les femelles sont parasites, elles forment une cellule alimentaire avec sa partie antérieure.

5. Les Nématodes des tiges et des bulbes (figure 32):

Les nématodes peuvent attaquer aussi les parties supérieures des plantes.

Ils utilisent des films d'eau pour remonter la tige de la plante.

Les larves L4 pénètrent la plante par les tissus végétaux des tiges ou des bulbes. Cependant, les larves peuvent remonter et pénétrer les pousses par l'intermédiaire de bourgeons, de pétioles ou de stomates.

Une fois dans la plante hôte, les larves muent en adultes qui se reproduisent, se nourrissent en tant qu'endoparasites migrants et détruisent les différents organes infectés (les cellules infectées nécrosées).

Le genre le plus connu est *Ditylenchus*.

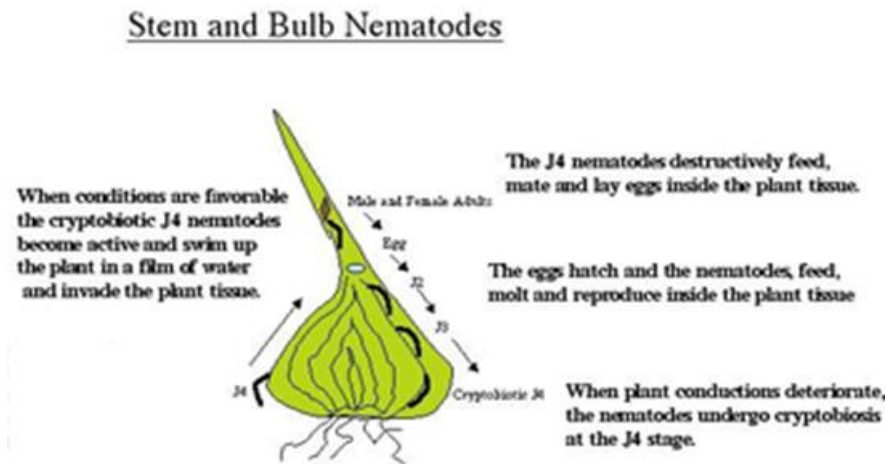


Figure 32 : Schéma d'un bulbe infecté par des nématodes

Source : www.apsnet.org

Traduction des légendes

- Quand les conditions sont favorables, les larves L4 en hibernation deviennent actives et nagent dans un film d'eau pour envahir les tissus de la plante.
- Les nématodes s'accouplent et pondent à l'intérieur du tissu végétal.
- Les œufs éclosent et les larves des nématodes muent jusqu'au stade de larve L4.
- Quand les conditions de la plante sont trop mauvaises, les nématodes entrent en hibernation au stade de larve L4.

6. Nématodes foliaires (figure 33):

Les nématodes adultes migrent dans les films d'eau des tiges jusqu'aux feuilles de leur plante hôte et pénètrent dans les feuilles par les stomates.

Une fois dans les feuilles, les nématodes migrent, se nourrissent, muent et pondent dans les feuilles tout en les détruisant (les cellules infectées se nécrosent).

L'activité alimentaire des nématodes provoque une chlorose et une nécrose intraveineuses caractéristiques de la feuille, qui finissent par la tuer.

Le seul genre connu est celui des *Aphelenchoides*.

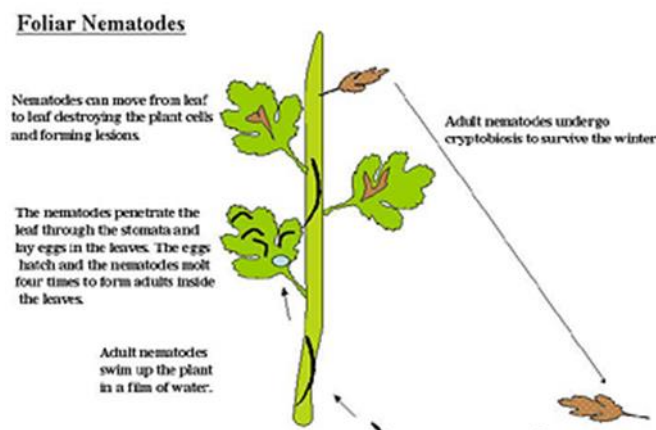


Figure 33 : Schéma d'une plante infectée par des nématodes foliaires

Source : www.apsnet.org

Traduction des légendes :

- Les nématodes se déplacent d'une feuille à l'autre en détruisant les cellules de la plante et provoquent des lésions.
- Les nématodes pénètrent dans les feuilles à travers le stomate et pondent dans les feuilles. Les œufs éclosent et les nématodes muent quatre fois pour former des adultes à l'intérieur des feuilles.
- Les nématodes adultes nagent sur la plante dans un film d'eau.
- Les nématodes adultes subissent une cryptobiose pour survivre à l'hiver.

7. Différents types de stylets.

En fonction du mode de parasitisme, différents types de stylet peuvent être utilisés par le nématode.

En effet, les ectoparasites auront des stylets longs et fins afin de pouvoir piquer les cellules végétales profondes depuis l'extérieur de la racine alors que les endoparasites auront plutôt des stylets courts et robustes pour leur permettre de détruire mécaniquement les cellules végétales et pénétrer la racine.

On retrouve la plupart de ces stylets et leurs caractéristiques dans les schémas en figure 34.

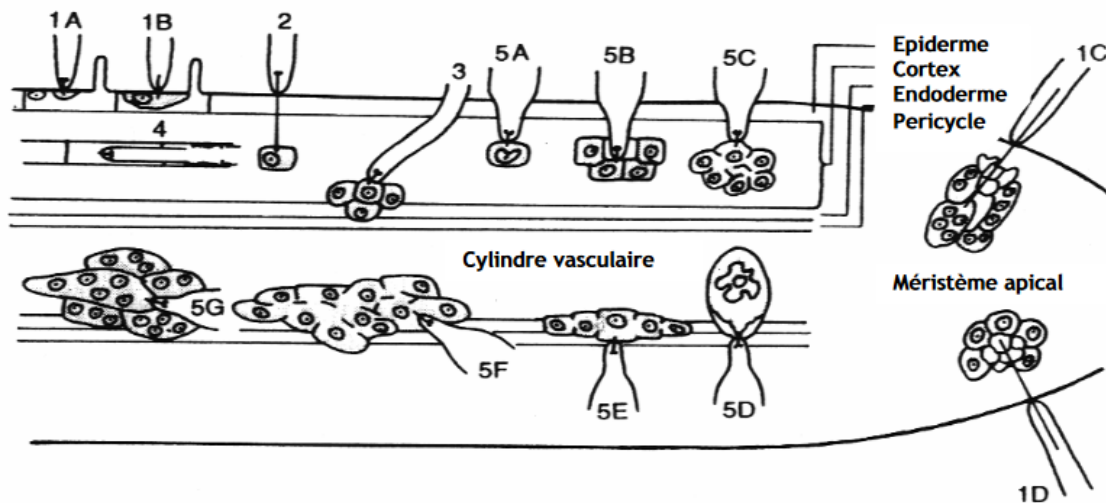


Figure 34: Représentation des modes de parasitisme des nématodes parasites de racines,

Source : IDENTIFICATION, POLYMORPHISME ET EVOLUTION MOLECULAIRE DE GENES DU POUVOIR PATHOGENE CHEZ LE NEMATODE A KYSTE DE LA POMME DE TERRE GLOBODERA PALLIDA, d'Alexandra BLANCHARD. D'après Sijmons et al, 1994.

Légende : **Ectoparasites migrants:** 1A : *Tylenchorhynchus dubius*, 1B : *Trichodorus* spp, 1C : *Xiphinema index*, 1D : *Longidorus elongatus*; **Ectoparasites sédentaires:** 2 : *Criconemella xenoplax*;

Ecto-endoparasites migrants: 3 : *Helicotylenchus* spp;

Endoparasites migrants: 4 : *Pratylenchus* spp;

Endoparasites sédentaires: 5A : *Trophotylenchulus obscurus*, 5B : *Tylenchulus semipenetrans*, 5C : *Verutus volvingentis*, 5D : *Cryphodera utahensis*, 5E : *Rotylenchulus reniformis*, 5F : *Heterodera* spp, 5G : *Meloidogyne* spp

c) Classement des principales espèces de nématodes phytopathogènes.

Dans ce paragraphe, nous allons voir deux types de classements des nématodes phytopathogènes :

- Une clé de classification (figure 35) et son explication
- Un tableau (figure 36) les regroupant en fonction de l'organe qu'ils parasitent et de leur type de parasitisme.

Pour définir à quel genre appartient un nématode, nous pouvons utiliser ce que l'on appelle une clé de classification (figure 35).

En effet avec cette clé et les paramètres morphologiques du nématode que l'on observe (taille du corps, forme de la queue, présence et type de stylets etc.) on peut en déduire son genre.

Je vais expliquer brièvement le fonctionnement de celle-ci

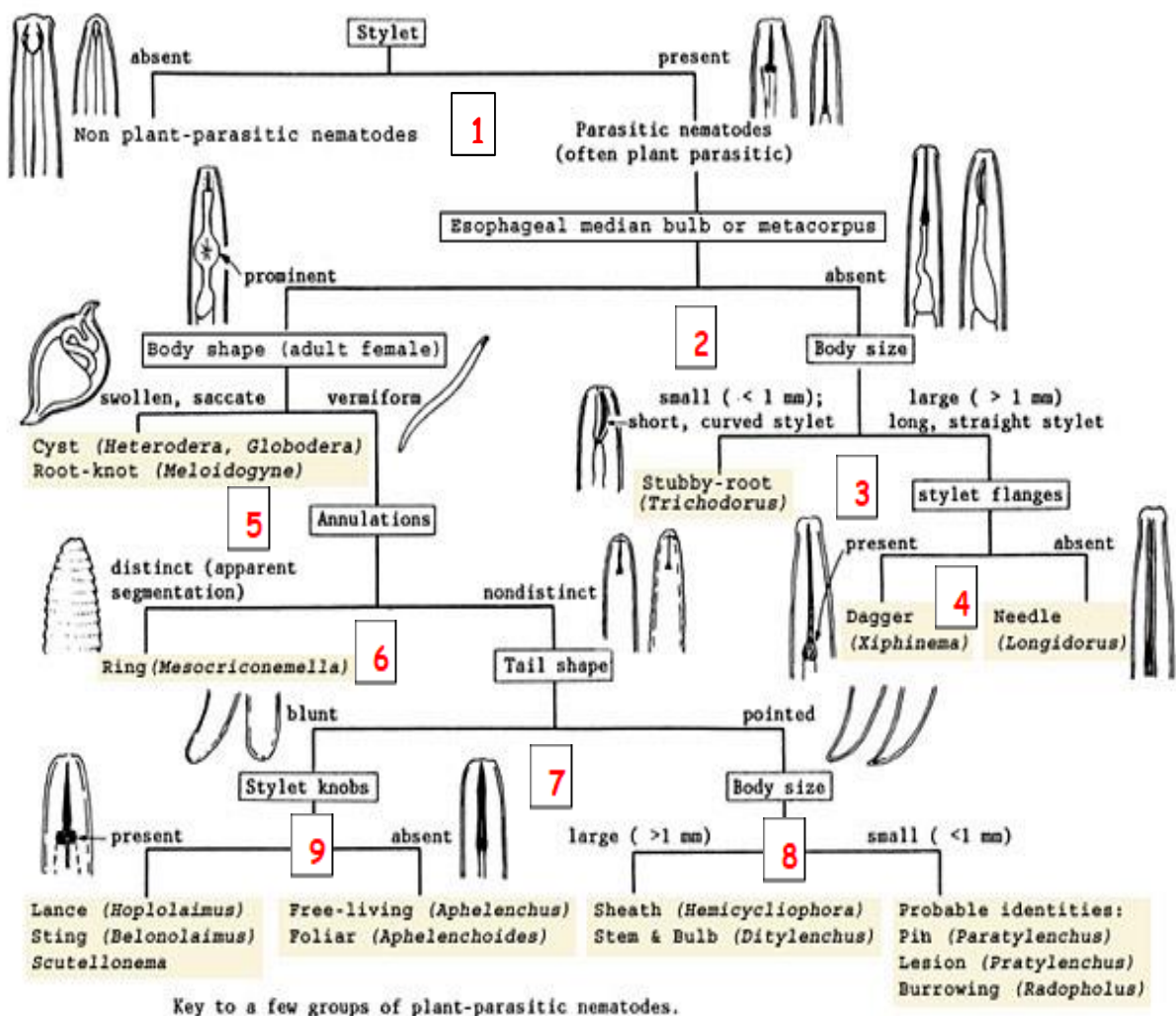


Figure 35 : Clé de classification des nématodes phytopathogènes

Source :

<https://www.apsnet.org/edcenter/K12/TeachersGuide/Nematode/Pages/LessonPlan.aspx>

Clé des nématodes phytoparasites :

- **1^{er}** embranchement : si le stylet est-il présent ?
 - OUI : il s'agit d'un nématode parasite de plante (direction vers le 2^{ème} embranchement)
 - NON : il ne s'agit pas d'un nématode parasite de plante
- **2^{ème}** embranchement : Le bulbe œsophagien médian est-il présent ?
 - OUI (direction vers le 5^{ème} embranchement)
 - NON (direction vers le 3^{ème} embranchement)
- **3^{ème}** embranchement : la taille du corps ?
 - Inférieur à 1mm avec un petit stylet incurvé, il s'agit du genre *Trichodorus* (Parasites de racines trapues)
 - Supérieur à 1mm avec un long stylet droit (direction vers le 4^{ème} embranchement)
- **4^{ème}** embranchement : présence de brides de stylets ?
 - OUI : il s'agit du genre *Xiphinema*
 - NON : il s'agit du genre *Longidorus*
- **5^{ème}** embranchement : quel est la forme du corps ?
 - Enflée : Il s'agit des genres *Heterodera* et *Globodera* si l'on retrouve des kystes et du genre *Meloidogyne* si l'on retrouve des nœuds(galles) au niveau des racines
 - Vermiforme (direction vers le 6^{ème} embranchement)

- **6^{ème}** embranchement : présence d'anneaux ?
 - OUI : il s'agit du genre *Mesocriconemella*
 - NON (direction vers le 7^{ème} embranchement)

- **7^{ème}** embranchement : quel est la forme de la queue ?
 - Arrondie (direction le 9^{ème} embranchement)
 - Pointue (direction le 8^{ème} embranchement)

- **8^{ème}** embranchement : taille du corps ?
 - Supérieur à 1mm : il s'agit des genres *Hemicycliophora et Ditylenchus*
 - Inférieur à 1 mm : il s'agit des genres *Paratylenchus, Pratylenchus et Radopholus*

- **9^{ème}** embranchement : Présence de boutons au niveau du stylet ?
 - OUI : il s'agit des genres *Noplolainus, Belonolaimus et Scutellonema*
 - NON : il s'agit des genres *Aphelenchus et Aphelenchoides*

Sur le tableau présenté en figure 36, nous classons les principales espèces en fonction de l'organe qu'ils parasitent et de leur type de parasitisme.

A chaque cas, on retrouve les familles et les genres de nématodes concernés.

Enfin, on retrouve aussi les principales plantes qu'ils touchent et leur importance dans le monde et en France.

[Figure 36: Classement des principales espèces de nématodes parasites de plantes \(sur page suivante\):](#)

Source : INNOVATIONS TECHNIQUES ET VARIETALES POUR UNE GESTION DURABLE ET INTEGREE DES NÉMATODES A GALLES DANS LES SYSTEMES MARAICHERS SOUS ABRIS de Caroline Djian-Caporalino

Type de parasitisme	Etat dans le sol ou la plante	Etat dans la plante	Nématodes		Principales plantes parasitées*	Classement / importance dans le Monde (Jones et al., 2013)	Importance en France (selon experts, enquêtes Djian-Caporallino 2010, 2012 & PCLég 2014)
			Famille	Genre			
Parasites de tiges, feuilles et bulbes	Migrateurs	Ectoparasites	Aphelenchoidae	<i>Aphelenchoides</i>	Riz, fraisier, laitue, concombre, melon, chrysanthème	10ème	localisés à des bassins de production, peuvent mettre la production en péril à l'échelle de la parcelle
		Endoparasites		<i>Bursaphelenchus</i>	Pin	6ème	nématodes de quarantaine non présents en France
		Endoparasites	Anguinidae	<i>Ditylenchus</i> (nématode des tiges)	Céréales, pomme de terre, betterave, ail, oignon, carotte, céleri, laitue, fraisier, poireau	5ème	fréquents mais localisés à certains bassins de production, peuvent mettre la production en péril
				<i>Anguina</i>	Blé (agent de la nielle) et autres céréales		
Parasites des racines	Migrateurs	Ectoparasites	Longidoridae	<i>Xiphinema</i> (nématodes poignards)	Vigne, arbres fruitiers, betterave, ail, fraisier, laitue, melon, poivron, tomate	8ème	localisés à des bassins de production, peuvent mettre la production en péril si espèce vectrice de virus
				<i>Longidorus</i>	Artichaut		rare et ne mettent pas la production en péril
			Trichodoridae	<i>Trichodorus</i>	Pomme de terre, tomate, ail, artichaut, carotte, poireau		fréquents mais localisés à certains bassins de production, peuvent mettre la production en péril
			Tylenchulidae	<i>Paratylenchus</i>	Laitue, melon, céleri, soja, prunier		fréquents mais localisés à certains bassins de production, peuvent mettre la production en péril
		Belonolaimidae	<i>Belonolaimus</i>	Coton, maïs, soja			
		Endoparasites	Pratylenchidae	<i>Pratylenchus</i> (nématodes à lésions)	Arbres fruitiers, citrus, bananier, fleurs, vigne, céréales, cultures maraichères (ail, oignon, artichaut, asperge, carotte, céleri, concombre, fraisier, haricot, laitue, melon, potiron, poireau, pomme de terre, tomate, Brassicacées)	3ème	fréquents mais localisés à certains bassins de production, peuvent mettre la production en péril
				<i>Pratylenchoides</i> (nématodes à lésions)	Ail, potiron		rare et ne mettent pas la production en péril
				<i>Radopholus</i>	Arbres fruitiers, cultures maraichères, maïs	4ème	
				<i>Hirschmaniella</i>	Betterave à sucre, pomme de terre, haricot	9ème	
		Ecto- ou semi-endoparasites	Hoplolaimidae	<i>Rotylenchus</i> (nématode spiralé)	Arbres fruitiers, maïs, cultures maraichères (ail, oignon, artichaut, carotte, fraisier, laitue, melon, potiron)		rare ou localisés à un bassin de production et ne mettent pas la production en péril
	<i>Rotylenchulus</i>			Melon		rare et ne mettent pas la production en péril	
	<i>Helicotylenchus</i> (nématode spiralé)			Ail, carotte, concombre, potiron, laitue, poireau, tomate		rare ou localisés à un bassin de production et ne mettent pas la production en péril	
	Telotylenchidae		<i>Tylenchorynchus</i>	Ail, concombre, laitue, poivron, tomate, potiron, sorgho		localisés à certains bassins de production et ne mettent pas la production en péril	
	Sédentaires	Ecto-, semi-ectoparasites	Tylenchulidae	<i>Tylenchulus</i>	Citrus, vigne		
			Trichodoridae	<i>Paratrichodorus</i>	Carotte, concombre		fréquents mais localisés à certains bassins de production, peuvent mettre la production en péril
			Criconematidae	<i>Criconemoides</i> <i>Criconema</i>	Ail, tomate, Potiron		rare et ne mettent pas la production en péril
		Semi-endoparasites	Hoplolaimidae	<i>Rotylenchulus</i>	Cultures maraichères, coton, bananier, vigne...	7ème	
		Endoparasites	Heteroderidae	<i>Heterodera</i> <i>Globodera</i> (nématodes à kystes)	Cultures maraichères (carotte, pomme de terre, betterave, Brassicacées), céréales, soja, arbres fruitiers, fleurs...	2ème	fréquents mais localisés à certains bassins de production, peuvent mettre la production en péril
			Meloidogynidae	<i>Meloidogyne</i> (nématodes à galles)	Cultures maraichères (aubergine, carotte, céleri, concombre, melon, potiron, courgette, épinard, haricot, laitue, mâche, oignon, poivron, tomates, scorsonère, Brassicacées, pomme de terre, poireau), colza, céréales, arbres fruitiers, fleurs...	1er	fréquents partout en France, peuvent mettre la production en péril

d) Symptômes et impacts qu'ils produisent sur les plantes.

D'après le docteur caroline Djian-Caporalino (biologiste à l'INRA d'Antibes) dans le magazine Phytoma en Septembre 2009 :

« (...)Les nématodes attaquent plus de 5500 espèces végétales dans le monde entier. Les dommages qu'ils provoquent sont évalués en dizaines de milliards d'euros chaque année.

En Europe, ils sont responsables de dégâts atteignant 10% de la production céréalière et entraînent des diminutions de récoltes de 20 à 30% dans les vergers d'agrumes méditerranéens.

On assiste alors à une forte diminution de la partie aérienne, due à la réduction des racines, qui se présente souvent par taches dans un champ, et la récolte peut parfois être réduite à néant. Les dégâts sont néanmoins difficilement chiffrables en raison des nombreuses interactions liant les nématodes à galles à d'autres pathogènes fongiques ou bactériens (Phytophthora, Rhizoctonia, Pythium, Fusarium, Pseudomonas, Agrobacterium, etc.) favorisés par les lésions induites par l'entrée des nématodes(...) »

Les pertes, dues aux nématodes, au niveau mondial, peuvent être estimées à (d'après Agrios, 2005) :

- 11% de la production des cultures vivrières (exemples : céréales, légumineuses, banane, manioc, noix de coco, pomme de terre, betterave sucrière, canne à sucre, igname, patate douce)
- 14% pour les autres cultures (cultures maraîchères, fruitières et florales)

On peut d'ailleurs estimer les pertes mondiales entre 62 et 98 milliards d'euros (McCarter, 2009). (Figure 37)

Dans le tableau en figure 37, on retrouve le pourcentage des pertes dues aux nématodes et le coût qu'ils représentent.

En effet, les histogrammes verts sur le graphe ci-dessous représentent les pertes mondiales en millions d'euro que produisent les nématodes pour chaque plante. Attention ici, il n'y a que les cultures vivrières qui sont représentées.

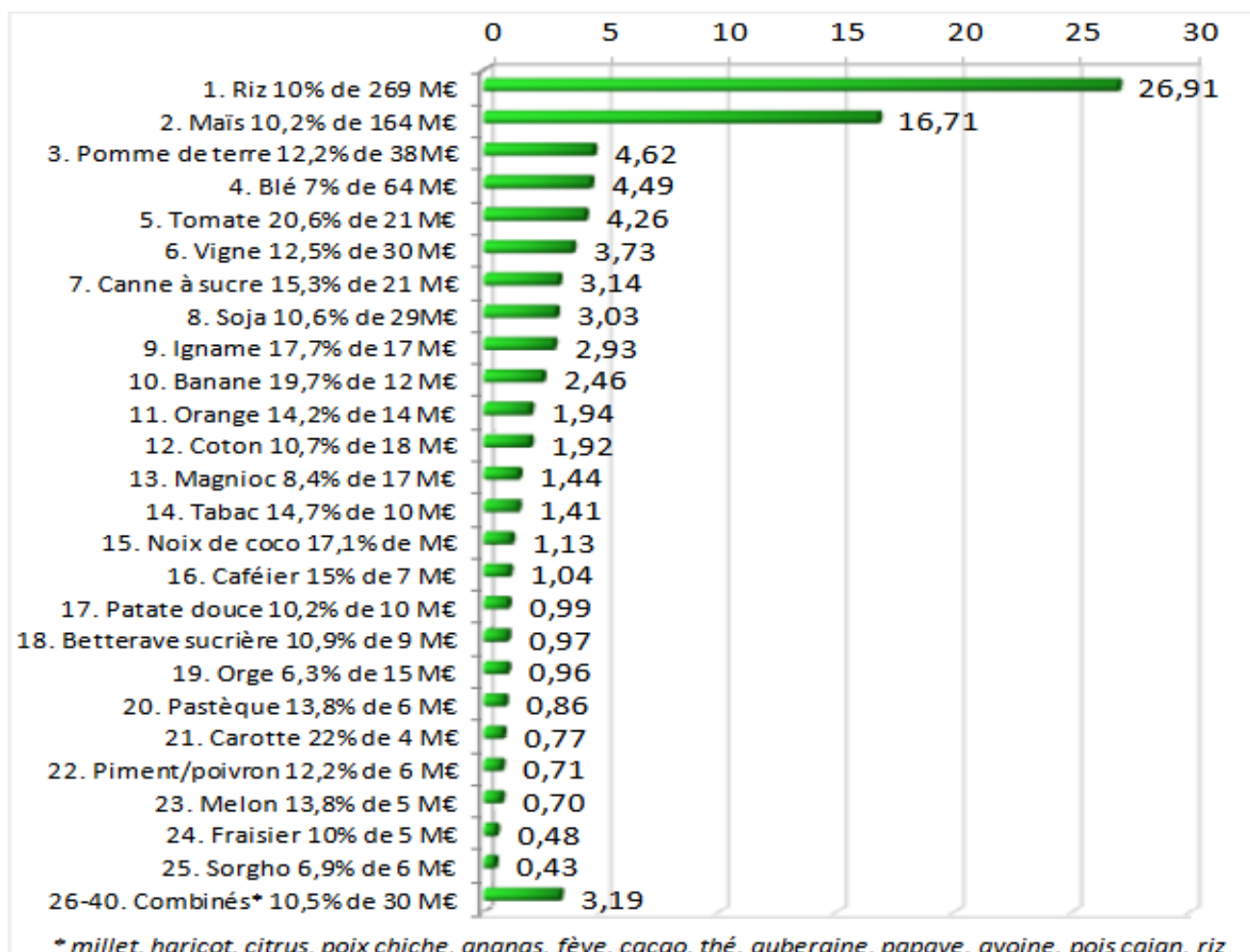


Figure 37 : Importance économique mondiale des nématodes phytoparasites en milliards d'euro

Source : INNOVATIONS TECHNIQUES ET VARIETALES POUR UNE GESTION DURABLE ET INTEGREE DES NÉMATODES A GALLES DANS LES SYSTEMES MARAICHERS SOUS ABRIS de Caroline Djian-Caporalino

On peut voir dans la figure 37, que dans chaque espèce de plantes, on retrouve pratiquement 10% de sa population qui est atteinte par les nématodes.

L'infection des plantes vivrières par les nématodes engendre donc d'énormes pertes que ce soit au niveau qualitatif, quantitatif et surtout au niveau financier.

Les nématodes sont des parasites obligatoires qui provoquent à travers le monde des dégâts considérables.

Pratiquement aucune culture n'échappe à l'attaque d'au moins une espèce de nématodes.

Les nématodes diminuent le rendement des cultures et surtout les rendent impropres à la consommation.

Nous allons aborder plus en détails le cas des nématodes à galles puis à kystes et les lésions qu'ils provoquent sur les plantes.

1. Cas des nématodes à galles.

Dans ce cas, les nématodes provoquent l'augmentation des cellules corticales accolées aux cellules géantes du site nourricier (ce qui forme la galle)

Ils perturbent l'absorption hydrique et minérale et provoquent une diminution des parties aériennes. Ils peuvent envahir tout le système racinaire et détruire ainsi toute la récolte.

Les indices de galles (de 0 à 10) permettent d'estimer les dégâts provoqués par les nématodes sur les cultures. (Figure 38)

0	système racinaire complet et sain ; pas d'infestation	1	très peu de galles de petite taille
2	petites galles plus facilement détectables	3	nombreuses petites galles ; chevelu racinaire encore complet
4	nombreuses petites galles ; quelques grosses galles ; système racinaire fonctionnant encore	5	25% du système racinaire comportant des galles et ne fonctionnant plus
6	50% du système racinaire comportant des galles et ne fonctionnant plus	7	75% du système racinaire comportant des galles et ne fonctionnant plus
8	quasiment plus de radicelles ; chapelets de grosses galles sur les racines principales ; la plante ne peut plus se nourrir	9	système racinaire réduit et rempli de grosses galles empêchant la plante de se nourrir
10	plante et racines mortes		

Figure 38: Système de notation des indices de galles pour estimer les dégâts dus aux nématodes à galles du genre *Meloidogyne* (selon Netscher et Sikora, 1990)

Source : *Djian-Caporalino, et al. Phytoma 2009*

La limite de tolérance de la plante face aux nématodes, que l'on appelle le « seuil de nuisibilité » est de l'ordre d'environ 100 à 1000 individus par kg de sol ou 10 à 100 individus par g de racine (DeGuiran, 1983)

Nous allons observer grâce à quelques photos les dégâts visibles des nématodes à galles sur les racines. (Figure 39). Cela va dépendre l'espèce du nématode et de sa quantité présente dans le sol.

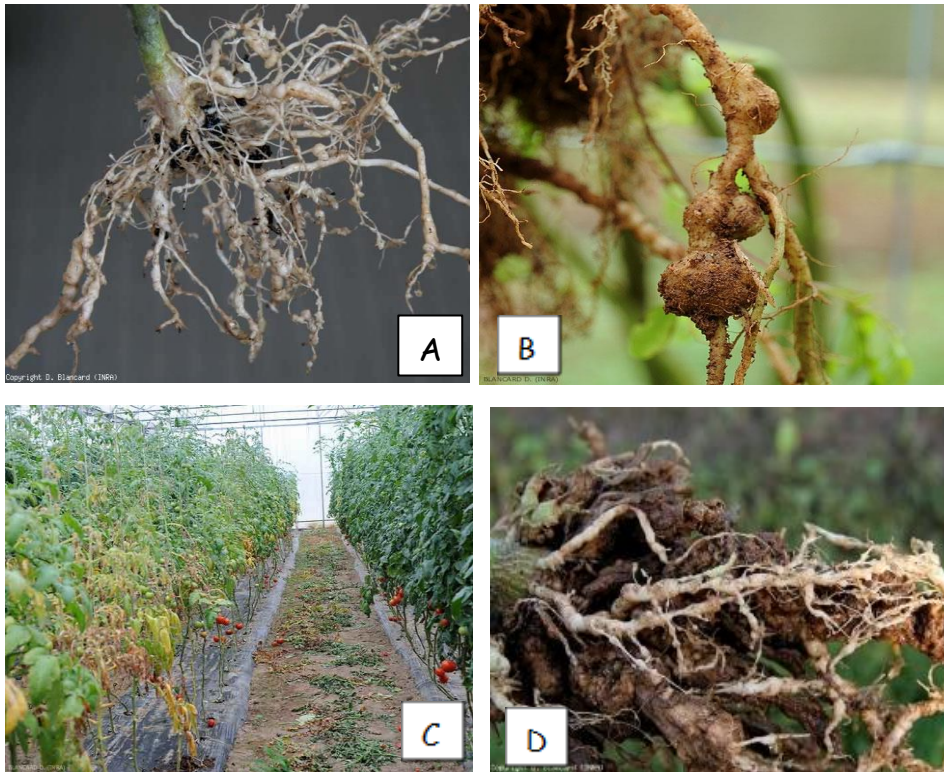


Figure 39: Photos montrant l'invasion par les nématodes à galles de différentes plantes.

Source : <http://ephytia.inra.fr/fr/C/5275/Tomate-Principaux-symptomes>

Copyright : D Blancard (INRA)

Sur ces photos, on peut observer différents symptômes que provoquent les nématodes à galles tels que :

- Des galles de la taille d'une perle qui touchent la totalité des racines. (Photo A)
- Des galles de grande taille couvrant parfois l'ensemble du système racinaire (photo B)
- La présence de feuillages qui peuvent être chlorotique, et présence de flétrissements qui surviennent parfois aux heures les plus chaudes de la journée. (Photo C)
- On peut observer aussi des renflements longitudinaux plus ou moins tortueux et étendus (photo D)

2. Cas des nématodes à kystes.

Les symptômes des nématodes à kystes sur les plantes sont assez similaires aux nématodes à galles.

En effet, on y observe aussi :

- Le jaunissement, flétrissement voire la mort du feuillage.
- Dans les cultures, des zones de croissance réduites.
- Des racines, tubercules avec des tailles réduites.

La différence avec les nématodes à galles est la présence de kystes bruns sur les racines, aux niveaux des tubercules ou dans le sol (figure 40).



Figure 40: Photo de kystes de nématodes sur des racines de plantes

Source : <https://www.fredon-lorraine.com/UserFiles/File/onr/nematodes-ppt/plaquette-nematodes-pdt.pdf>

CHAPITRE III

Moyens de lutte contre les nématodes

III) Moyens de lutte contre les nématodes phytopathogènes.

Les nématodes ont des caractères telluriques et endophytes et ils ont une forte résistance aux contraintes abiotiques, ce qui rend leur éradication totale d'un sol contaminé difficilement envisageable.

Les méthodes de lutte ont donc pour objectif d'abaisser les populations parasitaires sous un seuil de nuisibilité économiquement viable.

Ce seuil de nuisibilité correspond à la densité de nématodes en dessous de laquelle il n'y a pas de perte de rendement ou à la densité de nématodes entraînant des pertes de rendement inférieures ou égales au coût du traitement. Ce seuil varie d'une plante à l'autre, d'une région à l'autre, parfois même d'une année à l'autre, et est fonction des autres pathogènes présents dans le champ. (D'après Caroline Djian-Caporalino, *INNOVATIONS TECHNIQUES ET VARIETALES POUR UNE GESTION DURABLE ET INTEGREE DES NEMATODES A GALLES DANS LES SYSTEMES MARAICHERS SOUS ABRIS*, Décembre 2015)

Dans ce chapitre, nous allons répertorier les différentes méthodes de lutte contre les nématodes. Il s'agit de méthodes plus ou moins utilisées en fonction de leur impact sur l'environnement, de leur coût et de leur efficacité.

a) Les mesures prophylactiques.

Les mesures prophylactiques ont pour objectifs :

- D'éviter la contamination par les nématodes des parcelles saines.
- De réduire les risques de sur-infestation des parcelles déjà infestées par les nématodes et leur dissémination vers d'autres parcelles saines.

Ce sont des mesures nécessaires et indispensables pour limiter les infestations par les nématodes. Cependant, elles ne sont souvent pas suffisantes et sont la plupart du temps peu suivies.

Comme les nématodes se disséminent par le matériel et les personnes, les mesures prophylactiques se résument par :

- La gestion et le nettoyage des instruments de travail du sol tels que les outils, les roues de tracteur, les chaussures du personnel *etc*
Un nettoyage soigneux à l'eau avec un peu d'alcool ou d'eau de javel doit être effectué le plus souvent possible.
- La destruction des cultures contaminées et des mauvaises herbes (telles que morelle, amarante, chénopodes, rumex *etc*) qui permettent aux nématodes de se maintenir.
- Privilégier le travail du sol dans des zones saines plutôt que dans des zones infestées.

b) La lutte Chimique.

Utilisés jusqu'à récemment, les nématicides chimiques sont des produits extrêmement toxiques pour l'Homme, pour les animaux mais aussi très polluants pour les nappes phréatiques et très dangereux pour la couche d'ozone.

Ces molécules chimiques sont radicales face aux nématodes. En effet elles permettent de détruire 80 à 90% des parasites d'une culture infestée. Cependant, leur utilisation est limitée voire interdite à cause de leur toxicité sur l'environnement et pour les utilisateurs.

De plus, ils existent plusieurs points négatifs à leur utilisation :

- Les nématicides chimiques posent des problèmes sanitaires comme la réduction de la couche d'ozone, ils polluent l'air et les nappes phréatiques et sont de plus toxiques pour l'Homme et les animaux.
- Ils ne permettent de traiter que les 20 à 30 premiers centimètres du sol. Les nématodes des couches profondes ne sont donc pas détruits et attaquent les cultures suivantes, ce qui nécessite des traitements répétés.

Ils peuvent être utilisés de deux façons différentes soit par fumigation ou par action systémique :

1. La méthode par fumigation :



Figure 41: Photo représentant la méthode par fumigation

Source : photo INRA et dessin de J.C. Cayrol

L'utilisation de pesticides par fumigation consiste à introduire un gaz ou une substance donnant naissance à un gaz dans une atmosphère plus ou moins fermée ou directement dans le sol.

Les fumigants sont nématocides, fongicides, bactéricides et herbicides. Ils sont donc très toxiques et détruisent l'écosystème présent (animaux, insectes, champignons etc.).

Il s'agit d'une méthode qui nécessite une préparation rigoureuse du sol avec un arrosage intensif et maîtrisé des sols avant et après traitement. En effet cela permet de diminuer la dangerosité en diluant le pesticide dans le sol.

2. La méthode par action systémique :

Les pesticides systémiques pénètrent dans la plante par les racines ou les feuilles et sont véhiculés par la sève. Ils se diffusent donc dans toute la plante et se présentent sous une forme liquide ou sous forme de granulés.

Les molécules utilisées pour combattre les nématodes sont les organophosphorés et les carbamates.

On peut distinguer plusieurs types de pesticides systémiques en fonction de leur mode d'administration (figure 42) :

- Les pesticides systémiques translaminaires qui pénètrent dans les tissus de la plante après pulvérisation et qui sont diffusés par le phloème
- Les pesticides systémiques en Traitement de Semences (TS) qui pénètrent dans la plante par les racines et qui sont diffusés par la sève via le xylème (de bas en haut)

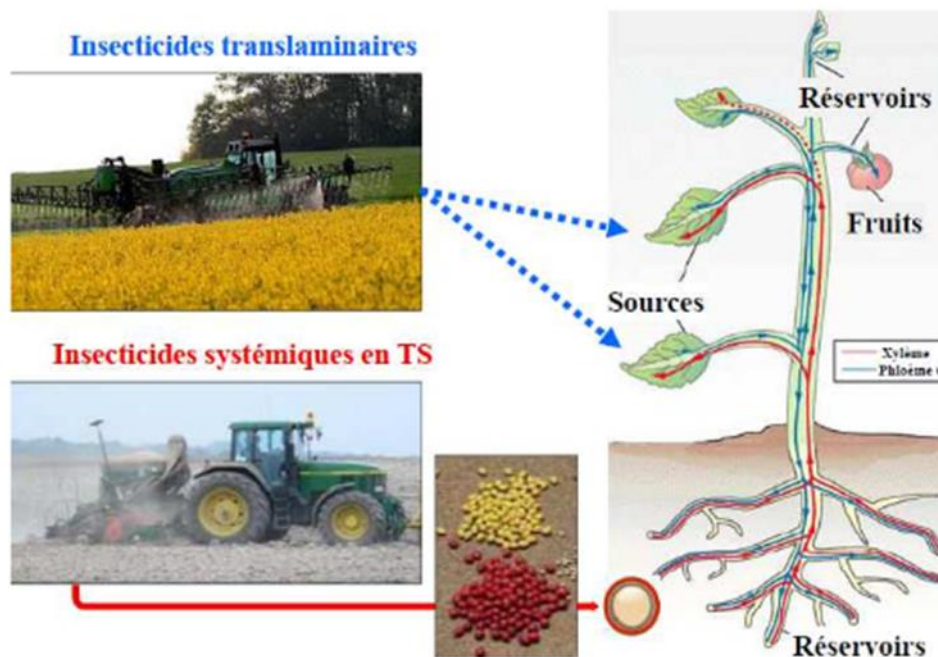


Figure 42: Principaux modes d'action des insecticides systémiques

Source:

<http://rucherecole68.thann.free.fr/Echo/themes/Interactions%20entre%20pesticides%20syst%C3%A9miques%20et%20abeilles.pdf>

3. Principales substances chimiques utilisées.

On retrouve dans le tableau en figure 43, les principales molécules utilisées contre les nématodes ainsi que leur statut légal aux niveaux européens et français.

Substances		Statut européen*			Statut français	
Fumigants	Bromure de méthyle (organohalogéné)	Années 40	Non approuvé 2008		Non autorisé	
	Enzone (tétrathiocarbonate)	Années 80	Non approuvé 2007		Non autorisé	
	1,3 dichloropropène (organohalogéné)	Années 50	Non approuvé 2007	Nouveau dossier 2013- 2014	Approbation au mieux 2016	AMM 120 jours pour certaines cultures (pomme de terre, carotte) si <i>M. chitwoodi</i> en particulier
	Chloropicrine (trichloro-nitrométhane)	Années 30	Non approuvé 2011	Nouveau dossier en cours d'étude		Non autorisé
	Métam sodium (thiocyanate)	Années 50	Approuvé 2012	Nouveau dossier en cours d'étude (Demande communautaire portant sur une augmentation de la dose)	Restrictions d'emploi : • 300 l/ha de spécialité C. ou 150 L/ha de SA) • 1 application/3ans • Pose d'un film barrière	AMM pour usages essentiels en traitement du sol / nématodes (uniquement autorisé sur légumes et plantes fruitières, plantes ornementales, arbres et arbustes)
	Dazomet (thiocyanate)	Années 50	Approuvé 2011	En cours de ré-évaluation	Restrictions d'emploi : • 500 l/ha de spécialité C. • 1 application/3ans	AMM pour l'usage Traitements du sol / Nématodes
	DMDS (diméthyl disulfure) : synthèse chimique à partir de produits pétroliers	Années 90	En suspens	Dossier déposé en 2012 (commercialisé aux USA depuis 2010)	Restrictions d'emploi : Pose d'un film barrière (problèmes d'odeurs)	Non autorisé Attendu pour 2016 (cf Projet 'SERUM')
	Fluorure de sulfuryle (oxyfluorure)	Années 90	Approuvé 2010	Expiration 2020	Restrictions d'emploi : Traitement en enceinte fermée	Pas de fonction nématicide propre mais autorisé en désinsectisation (par fumigation) des produits récoltés et des locaux de stockage
Systémiques	Fosthiazate (organophosphoré)	Années 2000	Approuvé 2004	Expiration 2016 Réexamen communautaire depuis 2013	Restrictions d'emploi : • 20 Kg/ha de SC sur PdeT et 20 Kg/pied sur banane • 1 application/3 ans	AMM uniquement pomme de terre et banane pour l'usage Traitements du sol / Nématodes
	Ethoprophos (organophosphoré)	Années 60	Approuvé 2007	Expiration 2018		Non autorisé depuis 2011. Molécule inscrite sur la liste Grenelle
	Fenamiphos (organophosphoré)	Années 60	Approuvé 2007	Expiration 2018	Restrictions d'emploi : uniquement sous serres	Non autorisé
	Oxamyl (carbamate)	Années 70	Approuvé 2006	Expiration 2018	Restrictions d'emploi : • pH acide autorisé uniquement en sol alcalin • 1 application tous les 2, 3 ou 5 ans selon les usages	AMM sur cultures légumières et ornementales, PdeT, maïs et tabac pour l'usage Traitements du sol / Nématodes
	Aldicarbe (carbamate)	Années 80	Non approuvé	Interdit depuis 2007		Non autorisé
	Carbofuran	Années		Interdit depuis		

Figure 43 : Situation des différents nématicides au vue de l'inscription au niveau européen et français

Source : Innovations techniques et variétales pour une gestion durable et intégrée des nématodes à galles dans les systèmes maraichers sous abris de caroline Djian-caporalino

4. Substances chimiques en cours de recherche.

Il existe aussi différentes molécules qui sont en cours de recherche au niveau mondiale, elles sont répertoriées dans le tableau en figure 44:

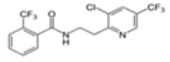
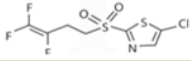
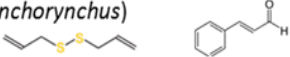
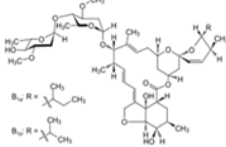
Substances		Statut européen*		Statut français	
« Nouveaux » produits	VELUM [®] = fluopyrame, classe des pyridinyl ethyl benzamides 	développé par Bayer Crop Science, autorisé en Afrique du Sud	Inscrit en 2014, expiration 2024	Homologation demandée sur tomate et pomme de terre pour 2016	Non autorisé
	NIMITZ [®] = fluensulfone, classe des fluoroalkenyl (-thioether) 	développé par Adama Agricultural Solutions, autorisé au Canada et en Australie	Non inscrit	Homologation demandée sur tomate pour 2016	Non autorisé
	MultiGuard Protect [®] ou Crop Guard [®] = furfural, classe des aldéhydes $C_5H_4O_2$, issu de l'hydrolyse acide de polysaccharides	développé par Illovo Sugar Ltd	Non inscrit		Non autorisé
	RESET [™] ou VBC-90017 = mélange de cinnamaldéhyde (huile de cannelle) et de diallyl disulfide DADS (ail), large spectre d'action (<i>Meloidogyne</i> , <i>Xiphinema</i> , <i>Tylenchorynchus</i>) 	développé par Valent Bioscience Corporation	Non inscrit		Non autorisé
	AVICTAR Complete Corn = abamectine, famille des avermectines, molécule complexe à large spectre d'action sur nématodes et insectes 	développé par Syngenta Seed Care. Molécule sur laquelle j'ai moi-même travaillé en 1992 pour la société MSD AgVeT France (efficace sur œufs et larves de <i>Meloidogyne in vitro</i> mais faible efficacité en traitement de sols organiques) (Cayrol et al., 1993).	Inscrit en 2009, expiration 2019	Travaillé en traitement de semences aux USA	Non autorisé

Figure 44: Molécules chimiques à l'étude dans la lutte contre les nématodes

Source : Innovations techniques et variétales pour une gestion durable et intégrée des nématodes à galles dans les systèmes maraichers sous abris de caroline Djian-caporalino

Les molécules chimiques sont des molécules très actives dans la lutte des nématodes. Cependant il s'agit d'un moyen de lutte très onéreux et surtout très dangereux pour la faune et la flore adjacentes. De plus, elles deviennent de moins en moins autorisées par les autorités car elles ont des actions non seulement toxiques mais aussi cancérigènes et tératogènes.

c) La lutte physique.

Il existe différentes techniques physiques permettant une lutte plus « naturelle » que l'utilisation de produits chimiques. Cependant ces techniques ne peuvent s'appliquer qu'aux petites surfaces et nécessitent le plus souvent de gros moyens financiers et matériels.

Nous allons brièvement en décrire quelques-uns :

1. La jachère nue :

Elle a pour principe de laisser nu la terre pendant plusieurs mois ou années et surtout durant les saisons sèches.

En effet, sans végétaux hôtes, les parasites ne peuvent survivre et sont détruits.

Cependant cette méthode peut entraîner des dégradations de la qualité du sol, telles que la perte de l'azote en profondeur lors de fortes pluies, le tassement du sol lors d'intervention de labourage voire même des problèmes de ravinement

2. La submersion :

Elle a pour principe d'inonder avec de l'eau les parcelles durant plusieurs mois (exemple des casiers rizicoles). En effet, les parasites ne résistent pas à une submersion aussi longue, ils meurent par asphyxie.

3. La vapeur d'eau sous pression :



Figure 45: Température à laquelle les différents pathogènes de plantes sont détruits

Source : cm-regero-industries.fr

Cette technique a pour principe d'augmenter pendant une dizaine d'heures la température du sol à 80-85°C dans un environnement clos.

C'est une méthode naturelle qui permet de nettoyer et de stériliser le sol tout en conservant ses qualités propres.

Elle est sans danger pour l'utilisateur, la plante et le sol. De plus, elle est fongicide, herbicide, nématocide et insecticide.

Cependant, cette méthode ne peut être utilisée que sur des surfaces restreintes et nécessite du matériel coûteux.

Il existe plusieurs versions à cette méthode :

1. La version manuelle qui utilise un générateur (figure 46) raccordé à de l'eau et de l'électricité, utilisé sous bâche ou sous coffre
2. La version automate (figure 47), qui utilise une machine brevetée (le « regero » par exemple) qui fonctionne en toute autonomie et qui ne nécessite aucun opérateur.

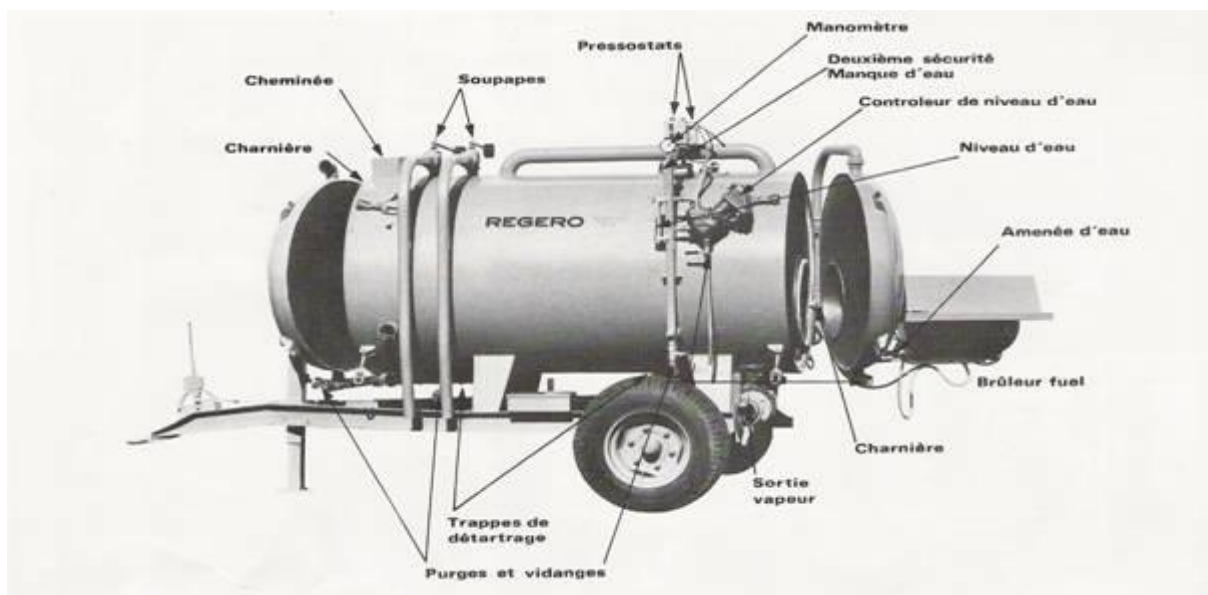


Figure 46: Schéma d'un générateur Regero permettant la désinfection à la vapeur des sols

Source : http://biosol.free.fr/liens/patho_2004/lutte/la_vapeur.htm



Figure 47: Photo d'un automate Regero permettant la désinfection à la vapeur des sols

Source : http://biosol.free.fr/liens/patho_2004/lutte/la_vapeur.htm

4. La solarisation :

La solarisation est une méthode qui ne peut être utilisée que dans des régions fortement ensoleillées pendant une durée minimum de deux mois.

Elle utilise un film en polyéthylène très fin permettant d'augmenter l'impact du rayonnement solaire sur le sol et de générer de la chaleur par effet de serre.

Cette technique présente quelques défauts :

- Elle n'atteint que les couches superficielles du sol
- Elle dépend aussi de sa nature et de sa capacité à diffuser la chaleur
- Elle ne peut être utilisée que dans des régions ou des pays fortement ensoleillés



Figure 48: solarisation en plein champ et sous abri

Source : GRAB

d) La lutte biologique :

Dans ce chapitre, nous allons décrire toutes les méthodes biologiques qui existent pour lutter contre les nématodes.

On retrouvera un résumé des méthodes les plus étudiées en figure 58.

1. Les plantes pièges

Toutes les plantes ne sont pas forcément parasitées par les nématodes. En effet, aujourd'hui, on dénombre environ 200 espèces de plantes ayant des propriétés nématocides (Djian-caporalino et al. 2008.)

Ces plantes nématocides peuvent agir contre les nématodes en :

- Inhibant la pénétration des jeunes larves dans la racine
- Inhibant l'éclosion des œufs de nématodes.
- Empoisonnant les nématodes

Tout d'abord, nous décrivons les différents types de plantes pièges en fonction des relations qu'elles entretiennent avec les parasites (les plantes pièges sensibles et les plantes pièges mauvais hôtes) ensuite les mécanismes intervenant dans ces phénomènes de « résistances ».

- **Les plantes pièges sensibles :**

Ce sont des plantes qui sont sensibles aux parasites, elles vont donc être parasitées.

Le principe est d'attirer les nématodes à l'intérieur de ces plantes et d'ensuite les détruire avant que le cycle du parasite ne soit terminé.

Cette méthode est utilisée essentiellement pour les nématodes endoparasites, en effet il faut que les nématodes accomplissent leur cycle de développement dans la plante.

Donc en détruisant l'un, on détruit l'autre puisque les larves ne peuvent ressortir des racines,

Cette méthode nécessite un contrôle continu de l'état des racines . En effet, il faut détruire les plantes sensibles pièges avant que le nématode puisse produire et extraire ses œufs.

Il s'agit donc d'une méthode délicate car si les plantes pièges ne sont pas détruites à temps, on empire la situation face aux nématodes.

Plusieurs conditions sont indispensables pour que cette méthode soit efficace, il faut absolument détruire les plantes avant que les œufs ne soient émis et que toutes plantes soient arrachées.

Nous avons plusieurs exemples de plantes pièges sensibles :

- La laitue (*Lactuca sp.*, *Asteraceae*) utilisée dans le nord-est de l'Espagne (Ornat et al. 2001).
- Le radis (*Raphanus sativus*, *Brassicaceae*) utilisé dans les jardins péri-urbains de Cuba (Cuadra et al., 2000)
- La carotte (*Daucus carotta*, *Apiaceae*)

- **Les plantes pièges mauvais hôtes :**

Les plantes pièges mauvais hôtes attirent les nématodes, mais elles les empêcheront d'accomplir leur cycle de développement.

En effet ces plantes utilisent différents mécanismes que nous allons décrire ensuite pour empoisonner les nématodes ou en ne leur fournissant pas les éléments indispensables au développement des femelles.

C'est en effectuant une rotation des cultures avec ces plantes pièges mauvais hôtes que l'on peut lutter contre les nématodes.

Ici on peut prendre l'exemple de :

- L'ail, l'oignon, l'asperge, le navet, le colza etc. contre le genre *Meloidogyne* (figure 49)
- La moutarde blanche et le radis fourrager contre le genre *Heterodera*

Utilisation	Famille botanique	Plante non hôtes ou mauvais hôte (*divergence d'opinion entre les enquêtés)
Plante cultivée	Apiaceae	Fenouil, coriandre, céleri-rave*, panais*, carotte*, persil*
	Brassicaceae	Navet, colza, chou-rave*, roquette*
	Chénopodiaceae	Epinard
	Liliaceae	Ail, oignon, asperge, poireau*, ciboulette*, échalotte*
	Rosaceae	Fraise*
	Valerianaceae	Mâche*
Engrais vert en interculture	Brassicaceae	Moutarde blanche, radis fourrager
	Fabaceae	Crotalaire, cytise des Indes, pois de Congo, arachide, soja
	Poaceae	Sorgho fourrager, avoine, millet perlé, sésame*, triticale*

Figure 49: Plantes non-hôtes ou mauvais-hôtes des nématodes à galles, susceptibles d'être utilisées en maraîchage

Source : *Innovations techniques et variétales pour une gestion durable et intégrée des nématodes à galles dans les systèmes maraichers sous abris de caroline Djian-caporalino (D'après une enquête réalisée en 2008 par H. Védie chez 14 producteurs en agriculture biologique dans les régions PACA et Languedoc-Roussillon, un essai mis en place en 2008 chez un producteur du Gard fortement infesté par M. arenaria, des données bibliographiques et une nouvelle enquête réalisée en 2015 auprès de l'APREL et du GRAB)*

- Les mécanismes de lutte des plantes pièges mauvais hôtes :

- Les mécanismes empêchant l'infection dans la racine :

- La Structure de la racine.

En effet, certaines protéines telles que la lignine, la subérine, la callose présentent dans certaines racines forment une barrière physique empêchant la pénétration des nématodes.

- La production et la diffusion de substances répulsives et/ou toxiques contre le nématode par les racines.

Ici il s'agit des phytoanticipines, ce sont des métabolites secondaires qui forment une véritable barrière chimique face aux pathogènes.

En effet, elles peuvent par exemple empoisonner la larve dès sa pénétration ou alors bloquer son développement et sa multiplication.

- Les mécanismes de défense post-infection empêchant le développement des femelles dans la racine :

Si la barrière physique et la barrière chimique ne suffisent pas à stopper le nématodes, d'autres mécanismes peuvent s'enclencher.

Il s'agit du système immunitaire des plantes. En effet, lorsque la plante est attaquée, le nématode produit des enzymes qui vont dégrader la cuticule, les parois cellulaires ou encore les phytoanticipines.

Les produits de dégradation que l'on nomme PAMPs (pour Pathogen-Associated Molecular Patterns) ou DAMPs (pour DamageAssociated Molecular Patterns) sont reconnus par des récepteurs, les PRR (pour Pattern Recognition Receptors) ou FLS2 (pour Flagellin Sensing), présents à la surface des cellules végétales.

C'est l'activation de ces récepteurs qui déclenche des cascades métaboliques induisant différentes réponses physiologiques de la plante telles que :

- L'alcalinisation du milieu extracellulaire qui empêchera le développement normal des nématodes.
- La synthèse « d'antibiotiques » naturels, les phytoalexines qui ont une action directe sur les larves.
- Les réactions d'hypersensibilité provoquant la mort cellulaire par production de peroxyde d'hydrogène, d'ozone ou d'ion superoxyde des cellules infestées par le parasite.

2. *Pasteuria penetrans* : la bactérie parasite des nématodes :

Pasteuria penetrans (figure 58) est un micro-organisme procaryote actinomycète présent naturellement dans le sol.

Il adhère à la cuticule du nématode lorsque celui-ci vient à sa rencontre. Cependant, il n'adhère qu'au 2^{ème} stade larvaire des nématodes qu'il reconnaîtra lors des différents changements chimiques pendant les mues successives.

Cycle de vie de *Pasteuria penetrans* sur un nématode :

- Les spores libres de cet actinomycète se fixent sur le nématode juvénile lorsqu'il se déplacera dans la terre. (Figure 50)

En général, les nématodes parviennent à entrer dans les racines et les spores fixées sur la cuticule du parasite ne commencent à germer qu'une huitaine de jours plus tard.

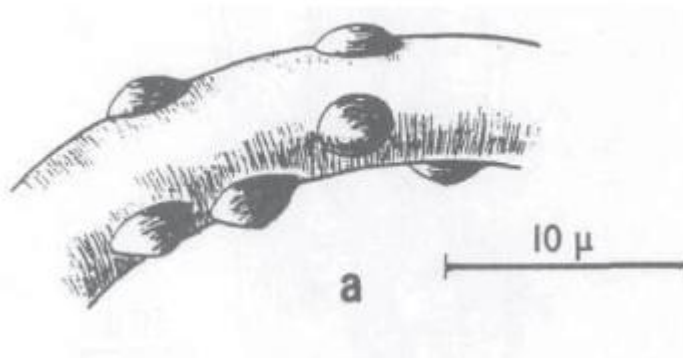


Figure 50: Schéma de spores de *Pasteuria Penetrans* collées sur la cuticule partie d'un nématode

Source : *la lutte biologique contre les Nématodes phytoparasites*. J.-C. Cayrol, Caroline Djian-Caporalino, Elisabeth Panchaud-Mattei. *Courrier de la Cellule Environnement de l'INRA* ° 17

- La spore perce la cuticule à l'aide d'enzymes spécifiques et produit un tube germinatif pour atteindre la cavité générale (pseudocoelome) du nématode. (Figure 51)

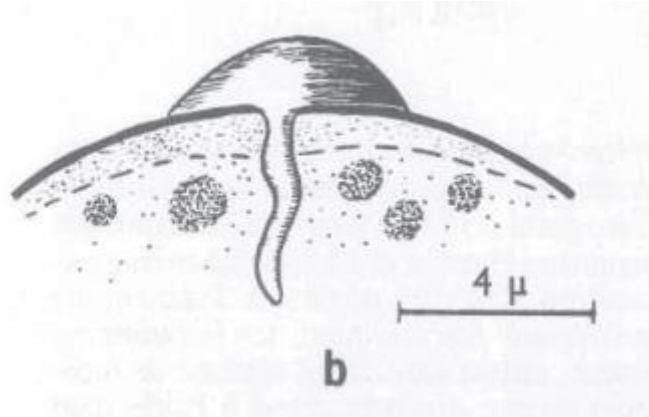


Figure 51: Schéma du filament de Pasteuria Penetrans perforant la cuticule du nématode.

Source : la lutte biologique contre les Nématodes phytoparasites. J.-C. Cayrol, Caroline Djian-Caporalino, Elisabeth Panchaud-Mattei. Courrier de la Cellule Environnement de l'INRA ° 17

- Une fois le centre du nématode atteint, le tube germinatif se ramifie pour se reprendre partout à l'intérieur du nématode. Il forme alors une structure filamenteuse qui se nomme le thalle.
- La septation de ce thalle donne naissance à des spores qui remplissent le corps du Nématode.
Celui-ci devient une sorte de conteneur, un « sac à spores » (pouvant en renfermer jusqu'à 2 millions) où tous les organes sont détruits.
- Enfin sous la pression des spores, le nématode éclate et celles-ci sont disséminées dans le sol et prêtes à se fixer sur d'autres parasites

3. Les champignons

Différentes recherches ont démontré l'existence de différents champignons prédateurs des nématodes.

- **La systématique phylogénétique mycologique des genres nématophages :** (les lignées où la nématophagie existe sont très peu nombreuses, et la nature des mécanismes mis en jeu sont encore plus spécifiques)

Division des ASCOMYCOTA

1) Classe des Orbiliomycètes - Ordre des Orbiliales - Famille des Orbiliaceae (pièges de différentes natures)

- Arthrobotrys, Candelabrella, Dactylella, Duddingtonia, Monacrosporium (et sans doute Dactylaria également, encore de position incertaine - incertae sedis)

2) Classe des Sordariomycètes - Ordre des Hypocreales - Famille des Cordycipitaceae (ovicides)

- Paecilomyces

3) Classe des Sordariomycètes - Ordre des Hypocreales - Famille des Ophiocordycipitaceae (spores collantes) - à noter que tous les (autres) représentants de cette famille sont entomopathogènes (parasites)

- Ophiocordyceps (= Hirsutella)

4) Classe des Sordariomycètes - Ordre des Glomerellales - Famille des Plectosphaerellaceae (ovicides)

- Verticillium

Division des BASIDIOMYCOTA

1) Classe des Agaricomycètes - Ordre des Cortinariales - Famille des Strophariaceae

- Stropharia (avec des acanthocytes, interprétés comme pièges à nématodes chez de rares espèces) - non cité dans la thèse

2) Classe des Agaricomycètes - Ordre des Polyporales - Famille des Pleurotaceae

- Pleurotus, Hohenbuehelia (avec des gloeosphex, en particulier, qui sont des cellules pourvues de pièges collants - et riches en enzymes pour digérer la victime)

On peut aussi les classer en fonction de leur mode d'action :

- **Les champignons « piègeurs » :**

Ces champignons connus depuis plus d'un siècle capturent et se nourrissent des nématodes au moyen de pièges plus ou moins élaborés.

On distingue plusieurs mécanismes de captures que nous allons décrire brièvement ici :

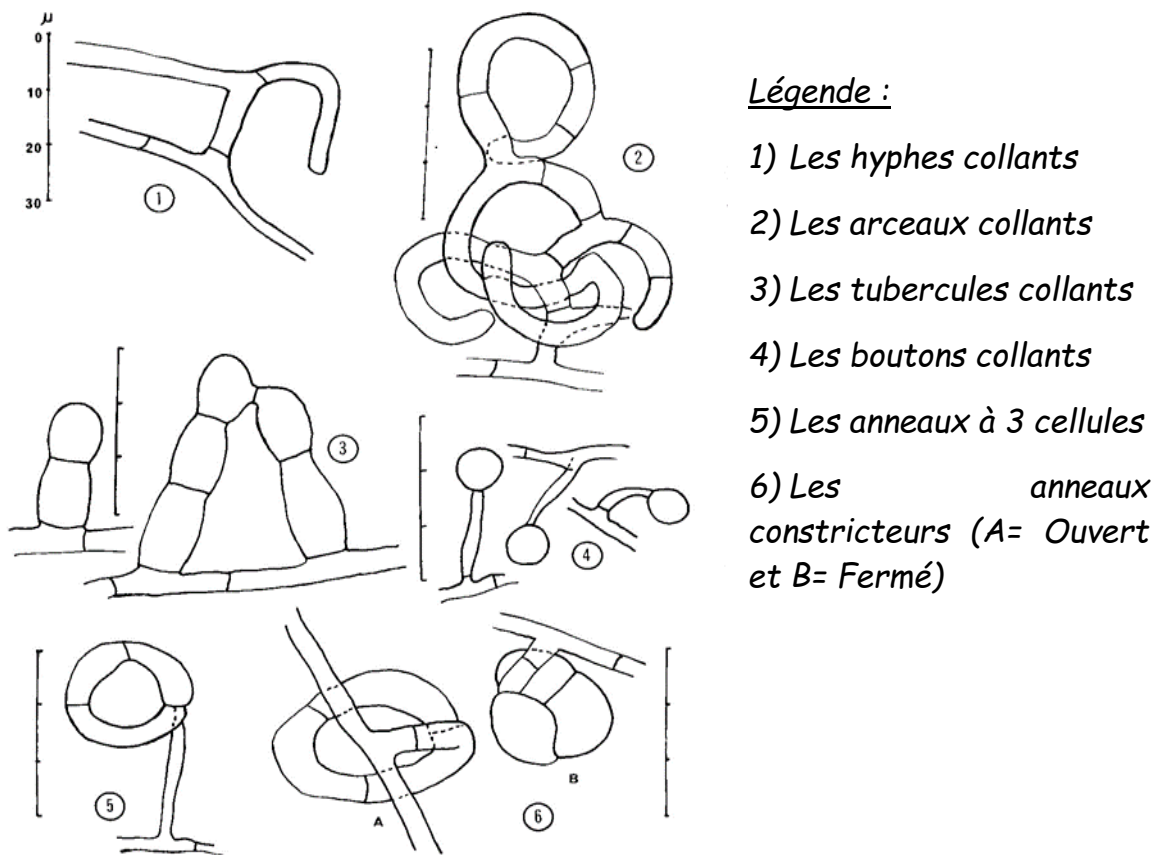


Figure 52 : Schéma des différents mécanismes de capture des champignons prédateurs des nématodes.

Source : *Les Hyphomycètes prédateurs de Nématodes : phénomène de prédation; écologie; utilisation en lutte biologique.* Michèle PELOILLE. Agronomie, EDP Sciences, 1981.

1) Les hyphes collants sont le mécanisme le plus primitif. Elles capturent les nématodes par adhésion à l'aide d'une substance collante qui le recouvre.

Les champignons qui utilisent ce système sont par exemple *Tridentaria implicans*, *Arthrobotrys anomala* et *A. botryospora*.

2) Les arceaux collants sont la forme la plus répandue. Il s'agit d'un système un peu plus complexe que les hyphes. Le docteur Michèle PELOILLE le décrit dans le magazine : *Agronomie*, EDP Sciences en 1981 :

«(...) Un rameau, issu latéralement d'un filament mycélien, croît puis s'anastomose avec l'hyphe d'origine, formant une boucle. De cette première anse, naissent d'autres branches qui se dirigent dans des plans différents de celui qui renferme la première boucle et s'anastomosent avec celle-ci. Le phénomène se reproduit plusieurs fois et il se constitue ainsi un réseau formé de plusieurs arceaux situés dans les 3 dimensions de l'espace. Ces arceaux sont entièrement tapissés d'une substance collante à laquelle adhèrent les nématodes qui viennent à son contact(...) »

On rencontre ce type de piège dans différents genres tels que : *Arthrobotrys*, *Candelabrella*, *Dactylaria*, *Duddingtonia* et *Monacrosporium*

Un hyphomycète, plus précisément l'*Arthrobotrys irregularis* (figure 53 et figure 58), a été découvert dans les années 70. En effet, après de nombreuses expérimentations, on a pu confirmer son efficacité face aux nématodes à galles du genre *Meloigyne*.

En 1978, un brevet fut d'ailleurs déposé et sa commercialisation sous le nom S350 a débuté en 1983.

Le S350 est un produit vivant, contenant 60% d'humidité, fabriqué à partir d'un milieu à base de seigle et doit être conditionné selon certaines conditions (en petites quantités, maximum 2 kg, produit stérilement, conservation en chambre froide etc.).

Cependant , ce produit ne peut pas s'implanter dans tous les sols, en effet il requiert certaines contraintes vis-à-vis du pH, de la salinité, de la quantité de matière organique etc.

Une nouvelle formule a donc été produite sur le même milieu de culture, le T350 qui est déshydraté par flux d'air, sera donc plus facile à transporter et à conserver.

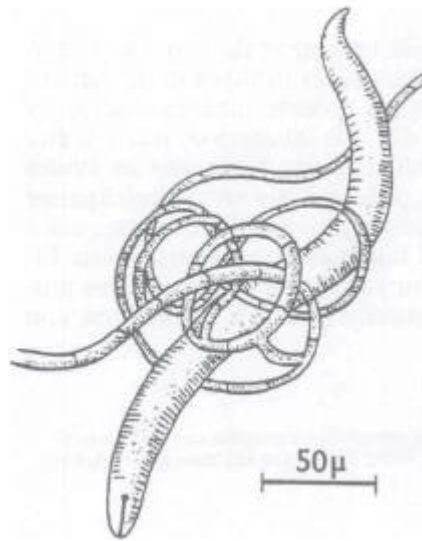


Figure 53: Schéma d'un nématode capturé par *A. irregularis*

Source : la lutte biologique contre les Nématodes phytoparasites. J.-C. Cayrol, Caroline Djian-Caporalino, Elisabeth Panchaud-Mattei. Courrier de la Cellule Environnement de l'INRA ° 17

- 3) Les tubercules collants sont un système formé d'excroissances collantes. Elles ont une forme de colonne simple ou ramifiée et sont composées la plupart du temps de 2 cellules. On observe aussi un rétrécissement au niveau des cloisons et peuvent s'anastomoser pour former des mailles.

Les espèces où l'on a observé ces tubercules sont *Dactylella ciuopaga* et *Dactylella gephyropaga*

- 4) Les boutons collants sont des petits boutons adhésifs, portés par un court pédoncule formé d'1 à 2 cellules. On les observe dans les genres *Dactylella*, *Dactylaria* et *Monacrosporium*

- 5) Les anneaux à 3 cellules sont portés par un pédoncule qui prend naissance perpendiculairement au mycélium. Ici, les nématodes qui ont un diamètre supérieur à celui de la lumière de l'anneau, y enfilent leur extrémité et y demeurent bloqués.

On retrouve ces anneaux chez *Dactylella asthenopaga* et *Dactylella lobata*

6) Les anneaux constricteurs sont le seul système de piège dit « actif ».

Il s'agit d'un dispositif similaire à celui vu précédemment, cependant, il possède un anneau plus large et les cellules sont sensibles au contact sur leur face interne.

Lorsque le nématode passe à travers celui-ci, il stimule les cellules et entraîne leur gonflement instantané et brusque jusqu'à ce que la lumière de l'anneau s'obstrue et emprisonne le nématode.

Ces champignons prédateurs sont largement répandus dans le monde. Quel que soit le type de piège, ils agissent toujours de la même manière :

- Le champignon piège le nématode qui se débat violemment.
- Il perfore alors la cuticule du ver et pénètre à l'intérieur.
- Il développe ensuite un bulbe d'infection qui lui permet d'envahir le nématode et d'en absorber son contenu jusqu'à provoquer sa mort.

- Les champignons ovicides :

Ces champignons luttent contre les nématodes en s'attaquant à leurs œufs. (Figure 54). En effet, les filaments percent la coque des œufs, y pénètrent et détruisent les embryons.

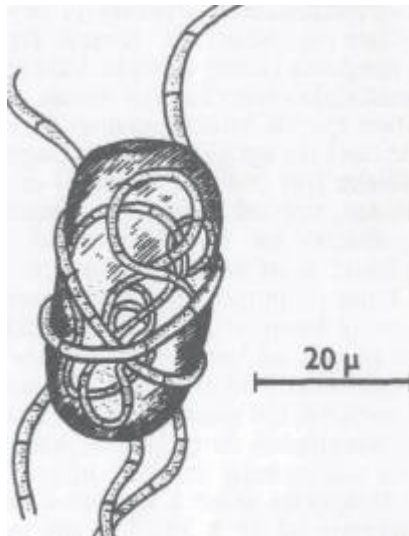


Figure 54: Œuf de Nématode parasité par un Champignon ovide

Source : *la lutte biologique contre les Nématodes phytoparasites*. J.-C. Cayrol, Caroline Djian-Caporalino, Elisabeth Panchaud-Mattei. *Courrier de la Cellule Environnement de l'INRA ° 17*

Deux espèces ont été étudiées de façon approfondie :

Paecilomyces lilacinus et *Verticillium chlamydosporium*.(Figure 58)

Paecilomyces lilacinus (figure 55) lysent la coque des œufs grâce à des enzymes. Il pénètre et parasite l'embryon.

Il est surtout adapté aux conditions tropicales et il est actuellement fabriqué par BIO-AC Technologies sous le nom de BIOACT aux Philippines.



Figure 55: Photo microscopique de Paecilomyces lilacinus parasitant des œufs de Meloidogyne

Source : Photo INRA Sophia antipolis

Verticillium chlamydosporium utilise le même mode d'action. Une souche a fait l'objet d'un brevet en 1991 (le CM1 : CC334168).

Il a tout de même un point faible, il ne peut parasiter le nématode qu'aux premiers stades de l'embryogénèse, au-delà celui acquiert une coque résistante.

Enfin, les champignons ovicides sont utilisés avec prudence puisqu'ils ne font pas la différence entre les œufs des nématodes nuisibles et ceux des nématodes utiles.

- Les champignons à spores adhésives :

Les spores fongiques se fixent sur le nématode et forment un filament germinatif qui pénètre dans l'hôte et se ramifie à l'intérieur. Tous les organes du nématode sont alors digérés et lysés.

La plupart des champignons concernés sont des parasites obligatoires et il n'a jamais été possible de les cultiver sur des milieux synthétiques.

Seuls des Hyphomycetes du genre *Hirsutella* (figure 56) ont pu être cultivés et beaucoup de travaux ont été publiés sur ce sujet (Sturhan et Schneider, 1980 ; Jaffee et Zehr, 1982 ; Castet, 1982) mais aucune application industrielle n'est encore au point à ce jour.

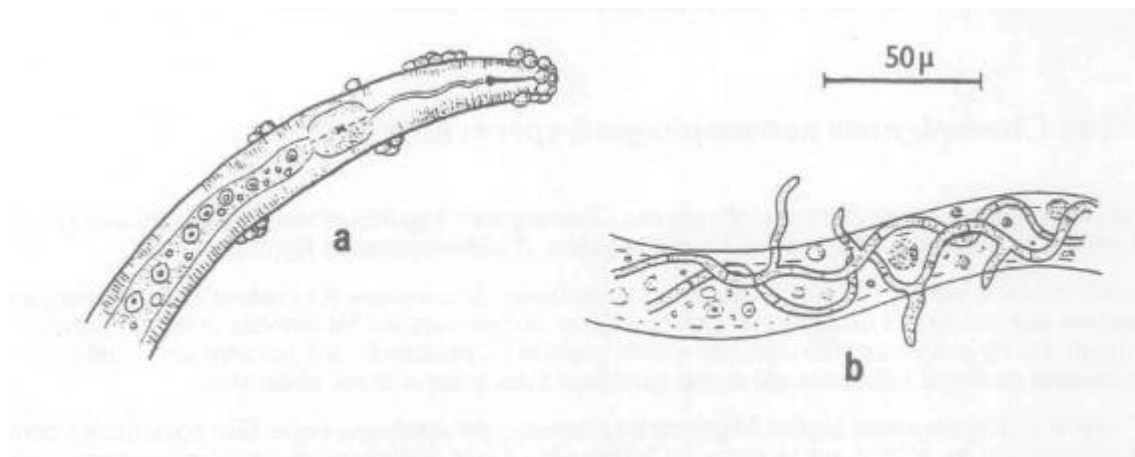


Figure 56: Schéma d'*Hirsutella* parasitant un nématode

- a) Spores adhésives sur la cuticule du nématode b) filaments parasites envahissant le nématode.

Source : la lutte biologique contre les Nématodes phytoparasites. J.-C. Cayrol, Caroline Djian-Caporalino, Elisabeth Panchaud-Mattei. Courrier de la Cellule Environnement de l'INRA ° 17

- Les endomycorhizes :

Définition : «... La mycorhize est le résultat d'une symbiose entre un champignon et une plante. La symbiose est un type de relation entre organismes à "bénéfice mutuel", c'est-à-dire que les deux organismes tirent profit de l'association.

Le champignon colonise les racines de la plante par ses hyphes, de fins filaments capables d'explorer un grand volume de sol. Si le développement du champignon est réalisé à l'intérieur des cellules de la racine, on parle d'endomycorhize. Ce phénomène est extrêmement courant : environ 80 % des plantes vasculaires sont associées à des champignons par endomycorhize ... »

Les mycorhizes (figure 57) ont des effets bénéfiques sur les cultures vis-à-vis des nématodes (compétition champignon-nématode, amélioration nutritionnelle, augmentation de la résistance etc.) Mais on ne connaît que peu de choses sur le mode d'action des endomycorhizes sur les nématodes et ces interactions sont pour le moment toujours à l'étude.

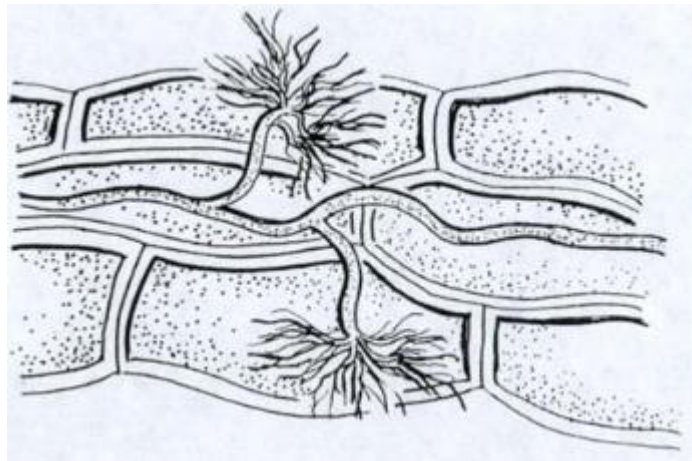


Figure 57: Dessin d'endomycorhize à arbuscule dans les cellules d'une racine

Source : dessin de J.C. Cayrol

4. La bactérie : *Bacillus firmus* :

La bactérie *Bacillus firmus* est utilisée comme nématicide dans une solution de biocontrôle qui se nomme FLOCTER°.

Cette solution de biocontrôle est produite par les laboratoires Bayer (Fiche technique en annexe 1 et fiche sécurité en annexe 2) et a un AMM française.

FLOCTER permet de traiter le sol contre les nématodes des genres *Meloidogyne*, *Heterodera* et *Protylechus*. C'est un nématicide d'origine naturelle, et qui contient 5 % de *Bacillus firmus*.

Il est destiné au traitement du sol pour contrôler les nématodes sur les cultures de carotte, concombre, laitue, melon, poivron, tomate, tabac et leurs cultures rattachées.

FLOCTER agit sur la dégradation des parois des œufs de nématodes, entraînant la mort des larves L1, ainsi que sur la réduction d'attractivité des racines pour les larves L2.

FLOCTER est utilisable en agriculture biologique.



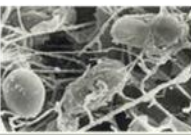


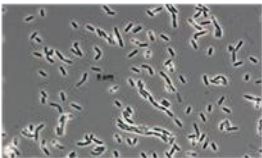
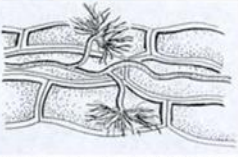
Agent biologique	Nom	Mode d'action	Limites	Statut européen*	Statut Français
Champignons imparfaits	<i>Arthrobotrys irregularis</i>, <i>A. conoides</i>, <i>A. oligospora</i> 	Nématophage: piégeage des larves grâce à des anneaux ou vésicules gluantes (Cayrol, 1983) 	Production, conservation, spécificité d'action, condition d'implantation dans le sol, coût de l'homologation	Non inscrit Brevet INRA n°7817624 (Cayrol, 1978). Commercialisé dans les années 80 par des sociétés productrices de champignons de couche.	Pas d'AMM actuellement
	<i>Purpureocillium (Paecilomyces) lilacinus (PL251)</i>, <i>P. fumosroseus (PjFe9901)</i> 	Parasite des oeufs et production de toxines larvicides (Jatala <i>et al.</i> , 1979, 1980 ; Carneiro, 1986 ; Carneiro & Cayrol, 1991)	Action en sols acides (pH < 6) et pour des températures comprises entre 25 et 35°C	PL251 inscrit depuis 2008 (expiration 2018). Commercialisé en Angleterre, au Portugal, en Italie, au Maroc (Bayer Crop Sc). Egalement en Afrique du Sud, au Brésil, aux USA : 26 produits !	Pas d'AMM
	<i>Pocconia (Verticillium) chlamydosporia</i> 	Parasite des oeufs et femelles (Irving & Kerry, 1986 ; Kerry & Deleu, 1991 ; Tahseen <i>et al.</i> , 2005)	Bonne efficacité en conditions tropicales mais moins bonne dans les conditions du sud de l'Europe	Non inscrit. En Italie, l'isolat <i>IPP-21</i> est commercialisé depuis des années (avec autorisation sans inscription) (Ciancio, comm. pers.). Différentes souches également commercialisées au Portugal. Egalement en Amérique, à Cuba, en Afrique, en Chine.	Pas d'AMM
Actinomycètes	<i>Pasteuria penetrans</i>, <i>P. thornei</i>, <i>P. nihizawae</i>, <i>Candidatus pasteuria</i> 	Parasites des larves (Sayrer & Starr, 1985)	Spécificité d'action, production en masse (parasite obligatoire)	Non inscrit. Commercialisé aux USA par Syngenta sur nématodes à kystes du soja (production en milieu synthétique en 2011 par Entomos LLC/CDG Laboratories)	Pas d'AMM
Bactéries	<i>Bacillus firmus</i>, <i>B. cereus</i> 	Dégradation de la paroi des oeufs, perturbation de la perception des exsudats racinaires par les larves (Yap Chin, 2013 ; Carneiro <i>et al.</i> , 1998)	Efficacité très variable en fonction des conditions climato-édaphiques (contrat avec Bayer en cours de négociation pour optimisation conditions d'application)	Souche <i>Bf CNCM I-1582</i> ('Flocter') inscrite et autorisée depuis 2012 sur carotte, concombre, melon, poivron, tomate et tabac pour l'usage Traitement du sol/Nématodes Souche <i>Bc CNCM I-1562</i> ('Votivo' et 'Poncho') en cours d'inscription pour traitement des semences de blé, soja, coton.	AMM pour 'Flocter' de Bayer contre <i>Meloidogyne</i> , <i>Heterodera</i> et <i>Pratylenchus</i> sur carotte, concombre, melon, poivron, tomate et tabac.
Endomycorhizes à arbuscules et vésicules (Endogonaceae)	<i>Glomus mossae</i>, <i>G. intraradices</i>, <i>G. fasciculatus</i>, <i>G. tenue</i>, <i>Gigaspora margarita</i>  Endomycorhyze à arbuscule dans les cellules d'une racine (dessin Cayrol)	Encore inconnu : -meilleure nutrition de la plante (symbiose) -stimulation de l'enracinement et de la croissance des racines -compétition trophique intra-racinaire possible - masquage du pouvoir attractif des racines -pas d'effet répulsif (Sikora & Schönbeck, 1975 ; Bagyaraj <i>et al.</i> , 1979 ; Cayrol, 1991 ; Cooper & Grandison, 1986 ; Azcon-Aguillar & Barea, 1996 ; Sharma & Sharma, 2015)	Cette méthode fait l'objet d'étude d'un de nos projets	Non inscrit	AMM MFSC : - 'Agri-Biotech Bioréveil et Myc' (Itech) - 'Humifirst' (Tradecorp) - 'Mycorhizes' (Giten & CPN) - 'Nutricœur' (Agronutrition)

Figure 58: Principaux agents biologiques luttant contre les nématodes

Source : Situation des différents agents biologiques contre les nématodes à galles au vue de l'inscription au niveau européen et français INNOVATIONS TECHNIQUES ET VARIETALES POUR UNE GESTION DURABLE ET INTEGREE DES NEMATODES A GALLES DANS LES SYSTEMES MARAICHERS SOUS ABRIS de Caroline Djian-Caporalino

e) La lutte génétique

Dans la lutte génétique, il existe deux types de résistance aux nématodes : les résistances naturelles et les résistances artificielles.

Nous allons expliquer ces deux types de résistances dans deux chapitres distincts.

1. Les résistances génétiques naturelles.

Au cours de leur évolution, les plantes ont développé un système de défense naturelle constitué par un large spectre de gènes de résistance.

En nématologie, on dit qu'une plante est résistante aux nématodes lorsqu'elle permet de réduire fortement ou totalement le nombre de nématodes femelles formées par rapport à une plante témoin non résistante.

Pour cela, deux types de réaction sont observées :

- Des réactions d'hypersensibilités qui empêchent les larves d'atteindre le stade adulte. (Phénomène Observé aussi chez les plantes mauvais-hôtes)
- Des réactions de masculinisation des nématodes adultes, empêchant donc la reproduction.

Cependant, dans la nature, il existe peu de cultures maraichères totalement résistantes aux nématodes. A ce jour, seulement une trentaine de gènes ont été identifiés et cartographiés. (Figure 59)

- Comment les utiliser et obtenir des cultures résistantes aux nématodes ?

On met en évidence un gène de résistance présent dans certaines variétés de plantes.

On fait alors plusieurs croisements entre ces plantes dites « résistantes » et des plantes dites « sensibles » afin d'obtenir une lignée fille, se rapprochant le plus possible de la variété cultivée mais possédant le gène de résistance.

- Quelles sont les Limites ?

Les gènes de résistance utilisés présentent souvent une spécificité et ne sont efficace que sur une ou deux espèces de nématodes.

On peut prendre l'exemple du gène H1, de la pomme de terre, qui a été utilisé de manière intensive aux Pays Bas, durant une dizaine d'année contre une population de *G. rostochiensis*. Cela a permis de réduire le niveau d'infestation par ce nématode, mais en contrepartie, les populations de *G. pallida* initialement présentes en faible proportion dans le sol, se sont développées de manière exponentielle.

De plus, dans diverses parties du monde, on retrouve de plus en plus de nématodes dit « virulents » et résistants vis-à-vis de ces gènes.

Le risque principal que provoque ces phénomènes est l'appauvrissement rapide des ressources génétiques naturelles disponibles.

- Quel est l'avenir de la lutte génétique ?

A l'échelle mondiale, un seul gène est commercialisé depuis près de 60 ans. Il s'agit du gène Mi-1 de la tomate. Il contrôle *M. incognita* et *M. arenaria*, cependant il n'est pas actif au-delà de 32°C.

Il a été intégré, à partir d'une seule plante sauvage dans toutes les variétés de tomates résistantes et les plantes mauvais hôtes actuellement disponibles pour la tomate ou l'aubergine.

Cependant dans diverses régions du monde, on observe une augmentation et une extension rapide de *Meloidogyne* virulents vis-à-vis de ce gène.

L'INRA expérimente et étudie de nouveaux gènes de résistances afin d'éviter ce phénomène de « nématodes virulents ». Ils sont pour l'instant testés en conditions contrôlées.

Ainsi, chez le piment/poivron, plusieurs gènes à large spectre d'action, robustes et stables à haute température sont étudiés mais non pas encore été diffusés dans les cultures (d'après Djian-Caporalino et al. , 1999, 2007)

Famille botanique de la plante	Nom de la plante	Gène de résistance	Nématode(s) concerné(s)
Amaranthaceae	Betterave	Hs1pro-1	Nématodes à kyste de la betterave : <i>Heterodera schachtii</i>
Apiaceae	Carotte	Mj-1	Nématode à galle : <i>Meloidogyne javanica</i>
Fabaceae	Soja	Plusieurs QTL	Nématode à galle : <i>M. incognita</i>
		Rhg1 et Rhg4	Nématode à kyste du soja : <i>Heterodera glycines</i>
Poaceae	Blé	Cre1	Nématodes à kyste des céréales : <i>Heterodera avenae</i> , pathotype australiens et européens
		Cre3	Nématodes à kyste des céréales : <i>H. avenae</i> , pathotype Australiens
	Riz	Hsa-1Og	Nématodes à kyste : <i>Heterodera sacchari</i>
Rosaceae	Prunier	Ma	Nématode à galle : <i>M. incognita</i> , <i>M. arenaria</i> , <i>M. javanica</i>
Solanaceae	Piment	Me3	Nématodes à galle : <i>Meloidogyne incognita</i> , <i>M. arenaria</i> , <i>M. javanica</i> et quelques populations de <i>M. hapla</i>
	Pomme de terre	H1	Nématodes à kyste de la pomme de terre : <i>G. rostochiensis</i> , pathotypes Ro1/4
		Gpa2	Nématode à kyste de la pomme de terre : <i>G. pallida</i> (populations D383 et D372)

		Gro1 -4	Nématodes à kyste de la pomme de terre : <i>G. rostochiensis</i> , pathotype Ro1
		Rmc1	Nématode à galle : <i>Meloidogyne chitwoodi</i> , <i>M. fallax</i> et quelques populations de <i>M. hapla</i>
	Tomate	Hero A	Nématode à kyste de la pomme de terre : <i>Globodera rostochiensis</i> , pathotypes Ro1, Ro3 et Ro5; <i>Globodera pallida</i> , pathotypes Pa2et Pa3, et Pa2/3
		Mi-1	Nématodes à galle : <i>Meloidogyne incognita</i> , <i>M. javanica</i> , <i>M. arenaria</i> . (Également efficace contre le puceron de la pomme de terre <i>Macrosiphum euphorbiae</i> et la mouche blanche <i>Bemisia tabaci</i>)
		Mi-3	Nématodes à galle : <i>Meloidogyne incognita</i> , <i>M. javanica</i> , <i>M. arenaria</i>
		Mi-9	Nématodes à galle : <i>M. incognita</i>

Figure 59: Cartographie des gènes de résistance aux nématodes endoparasites sédentaires (liste non exhaustive)

Source : INNOVATIONS TECHNIQUES ET VARIETALES POUR UNE GESTION DURABLE ET INTEGREE DES NEMATODES A GALLES DANS LES SYSTEMES MARAICHERS SOUS ABRIS de Caroline Djian-Caporalino

IDENTIFICATION, POLYMORPHISME ET EVOLUTION MOLECULAIRE DE GENES DU POUVOIR PATHOGENE CHEZ LE NEMATODE A KYSTE DE LA POMME DE TERRE *GLOBODERA PALLIDA*, d'Alexandra BLANCHARD

2. Les résistances génétiques artificielles.

Dans le cas des résistances génétiques artificielles, on crée des plantes génétiquement modifiées en ciblant et en identifiant les clés du succès parasitaire.

Pour cela deux stratégies de résistances artificielles sont à l'étude :

- On empêche l'alimentation du nématode par la destruction ou l'atténuation spécifique du fonctionnement du site nourricier.
- Ou on cible directement le nématode (locomotion, perception chémosensorielle, neurotransmission, mue, digestion, reproduction, développement etc.)

L'état actuel des connaissances permet surtout l'exploration de la première possibilité.

Je vais décrire quelques études qui ont été développées jusqu'à maintenant.

- Les sécrétions salivaires des nématodes:

Les nématodes utilisent leurs sécrétions salivaires pour migrer et pour initier leur site nourricier.

Ici le but est de produire des anticorps, appelés planticorps contre les antigènes sécrétés par les nématodes.

Des études ont été faites sur des plantes (Baum et al., 1996) et des protoplastes (Rosso et al., 1996) de tabac en faisant exprimer des anticorps monoclonaux ou simplement les chaînes légères des anticorps spécifiquement dirigées contre les protéines sécrétées par les nématodes.

Cependant les résultats n'ont pas été concluants puisqu'aucune incidence sur le parasitisme n'a été observée sur les plantes de tabac génétiquement modifiées.

- **Les protéases des nématodes :**

Les protéases sont vitales pour le nématode en effet elles lui permettent de se nourrir.

Une étude a été effectuée (Urwin et al. 2001) sur des pommes de terre modifiées en exprimant une protéine inhibitrice de protéases : la cystatine.

Cependant, avec cette méthode les résultats n'ont pas été concluant, puisqu' ils n'ont pas constaté de meilleure résistance qu'une variété semi résistante naturellement déjà utilisée dans une culture.

- **Inhibition des gènes des nématodes :**

Ici le principe est d'inhiber l'expression des gènes du nématode en fixant un ARNs de petit taille qui empêchera leur expression.

Le nématode doit donc ingérer ces ARNs pour que ce phénomène se produise.

Il existe deux difficultés pour y parvenir :

- Il faut que la plante exprime spécifiquement des ARNs double brin au niveau des cellules nourricières afin que le nématode les ingère lorsqu'il s'alimente sur la plante
- Il faut que l'efficacité de l'extinction génétique soit durable

Pour l'instant, selon les études menées (Rosso et al., 2005), l'extinction du gène n'est que transitoire et l'expression du gène atteint 80% de son niveau initial après 68 heures.

- Quelles sont les limites ?

Un organisme génétiquement modifié (OGM) est un organisme (animal, végétal, champignon, micro-organisme) dont on a modifié le matériel génétique d'une manière qui ne s'effectue pas naturellement, pour lui conférer une ou plusieurs caractéristiques recherchées.

La modification d'un organisme vivant impacte forcément l'équilibre écologique global, c'est pourquoi les OGM ont forcément des répercussions sur l'environnement, la faune et la flore.

Cependant nous n'avons pas encore assez de recul face à ces répercussions, il faut donc rester prudent avec ces modifications du génome.

CHAPITRE IV

Perspectives
d'avenir pour
l'équilibre
Alimentaire

IV) Perspectives d'avenir pour atteindre l'équilibre alimentaire sur la planète.

a) Modification de nos habitudes alimentaires : Entomoculture et l'entomophagie.

1. Définitions :

L'entomoculture est l'élevage d'insectes par l'Homme. Les insectes peuvent être utilisés à diverses fins : activité commerciale, nourriture pour l'Homme et/ou les animaux, étude scientifique etc.

L'entomophagie est la consommation d'insectes. L'Homme la pratique depuis des milliers d'années et l'on sait que plus de 3000 groupes ethniques soit 2,5 milliards de personnes dans le monde se nourrissent couramment d'insectes.

• Qu'est-ce qu'un insecte ?

Les insectes ont pour caractéristiques :

- Possèdent un exosquelette qui les protège de l'environnement.
- Ce sont les seuls invertébrés pourvus d'ailes.
- Ce sont des animaux à sang froid.
- Ils subissent des métamorphoses qui leur permettent de s'adapter aux saisons.

- Ou consomme-t-on des insectes ?

On retrouve sur la plupart des continents de nombreuses espèces d'insectes comestibles.

En effet, comme le montre la carte en figure 60, pratiquement toutes les régions de monde hormis quelques exceptions (tels que la Russie et le Canada) possèdent de nombreuses espèces d'insectes comestibles



Figure 60: Nombre d'espèces d'insectes comestibles répertoriés par région dans le monde

Source :

<http://www.fao.org/docrep/018/i3253e/i3253e.pdf>, consulté le 12/12/2014, Centre for Geo Information, Wageningen University, d'après Jongema, 2012)

Les populations qui en consomment couramment se trouvent dans le Sud-Est asiatique, en Afrique centrale et du Sud, et dans certaines régions d'Amérique du Sud.

Dans les pays développés, la consommation d'insectes reste marginale et expérientielle. En effet, pour ces populations, les insectes sont considérés comme non comestibles et sont porteurs de dégoût et de peur.

L'intérêt de l'entomophagie reste très récent, en effet, un rapport de la FAO sur les enjeux nutritionnels, économiques et écologiques n'est sorti qu' en 2013.

Dans ce rapport, on envisage les insectes comme alternative aux protéines animales face à l'augmentation croissante de la population mondiale, de la demande en protéines et à la raréfaction des ressources naturelles.

2. Espèces comestibles :

Il est difficile de répertorier aujourd'hui le nombre exact d'espèces d'insectes comestibles dans le monde. Cependant, on connaît les ordres majeurs les plus consommés (Figure 61).

D'après Jean Claude Monzenga Lokela docteur en Science agronomique :

« ... De 1500 à 2000 espèces d'insectes sont comestibles (Elorduy et al. 1991; MacEvelly, 2000; Malaisse, 2004; Choo 2007; Mitsuhashi 2008; Nonaka, 2009; Shorkley et Dossey, 2014) et sont consommées de manière plus ou moins régulière dans plus de 113 pays dans le monde (Jongema, 2012)... »

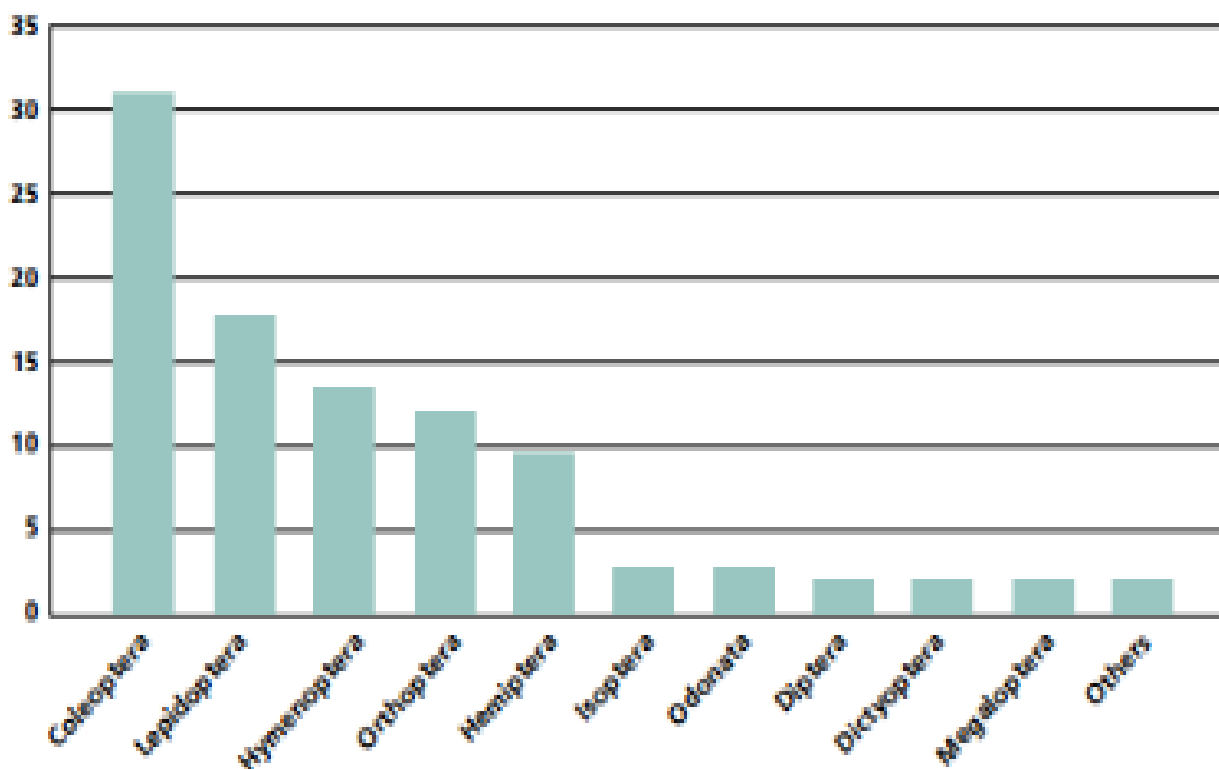


Figure 61: pourcentage d'espèces comestibles présent dans chaque ordre d'insectes

Source : <http://www.fao.org/docrep/018/i3253e/i3253e.pdf>, consulté le 12/12/2014, Centre for Geo Information, Wageningen University, d'après Jongema, 2012

D'après le graphe en figure 61, les insectes les plus consommés sont :

- Les scarabées (coléoptères, 31 %)
- Les chenilles (lépidoptères, 18 %)
- Les abeilles, guêpes et fourmis (hyménoptères, 14 %)
- Les sauterelles, criquets et grillons (orthoptères, 13 %)
- Les cigales, cicadelles, cochenilles et punaises (hémiptères, 10 %)
- Les termites (isoptères, 3 %)
- Les libellules (odonates, 3 %)
- Les mouches (diptères, 2 %)
- Les insectes appartenant à d'autres ordres (6 %).
-

Description de quelques ordres consommés :

- Qu'est-ce qu'un coléoptère : ce sont des insectes pourvu d'élytres (ailes antérieures épaisses) et d'ailes postérieures qui leur permettent de voler. Ils sont aussi pourvus également de mâchoires puissantes qu'on nomme mandibules et ils effectuent une métamorphose complète (c'est-à-dire que les stades larvaires sont différents de l'adultes de part leur morphologie mais aussi par leur régime alimentaire).

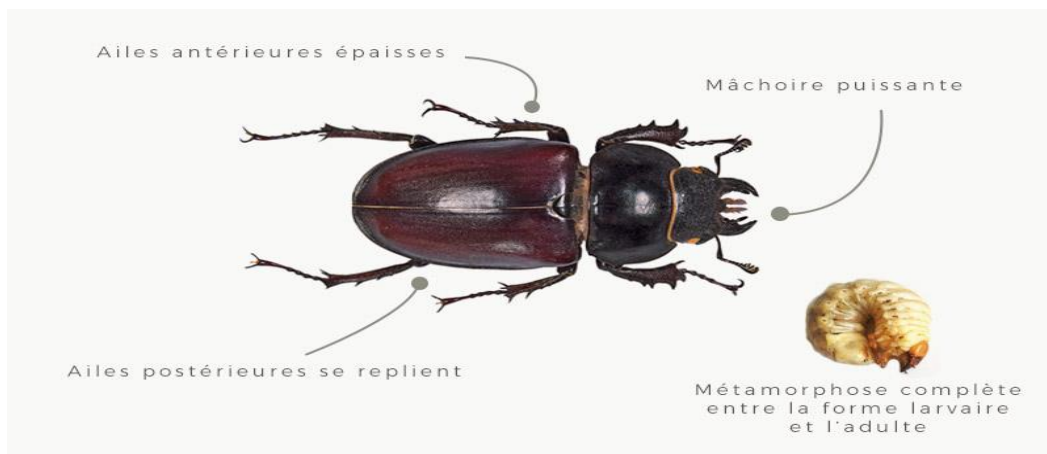


Figure 62: Photo d'un coléoptère sous forme adulte et larvaire

Source : <https://www.insectescomestibles.fr/content/12-les-coleopteres-qu-est-ce-qu-un-coleopteres>

- Qu'est-ce qu'un lépidoptère :

Ce sont des insectes à métamorphose complète où le stade adulte se nomme papillon et qui possède deux paires d'ailes couvertes d'écaillés et une trompe.

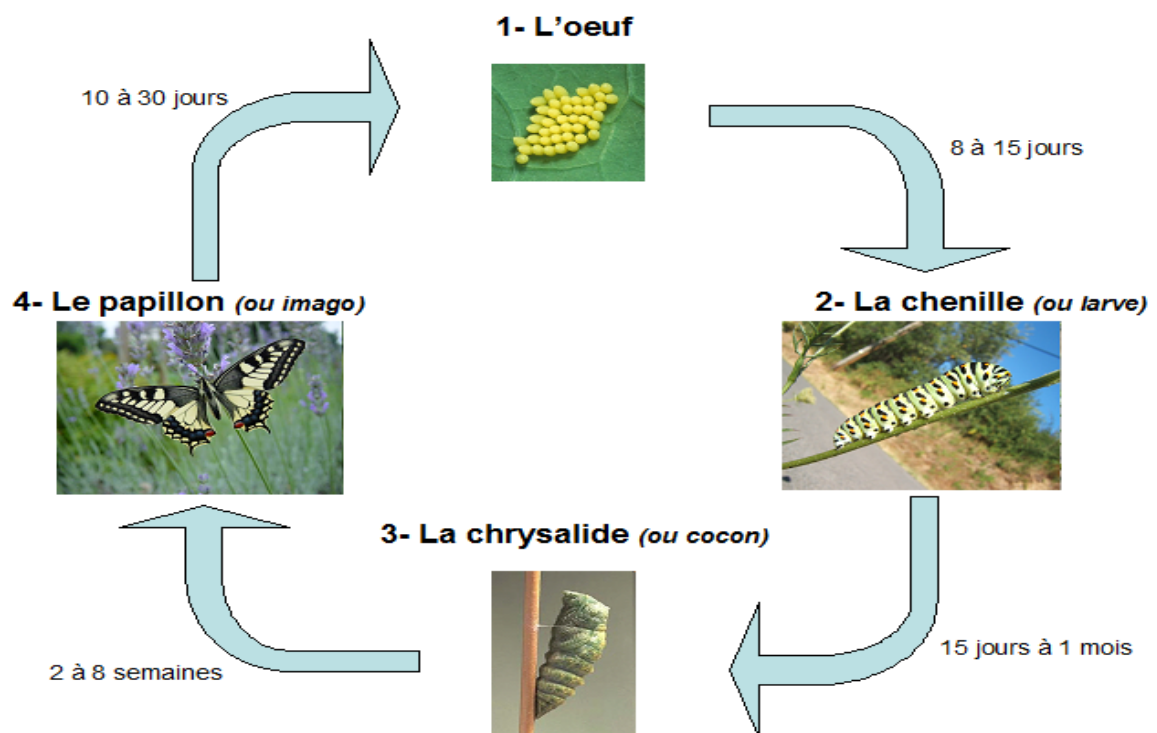


Figure 63: Cycle de vie d'un lépidoptère (métamorphose complète)

Source : <http://www.cypris.fr/biodiversite/papillons/papillons.htm>

- Qu'est-ce qu'un orthoptère :

Ces insectes qui ont une métamorphose incomplète (c'est-à-dire que les stades juvéniles ressemblent à l'adulte d'un point de vue morphologique mais aussi de leur régime alimentaire), ont pour caractéristiques, une paire d'élytre et une paire d'ailes droites alignées au corps.

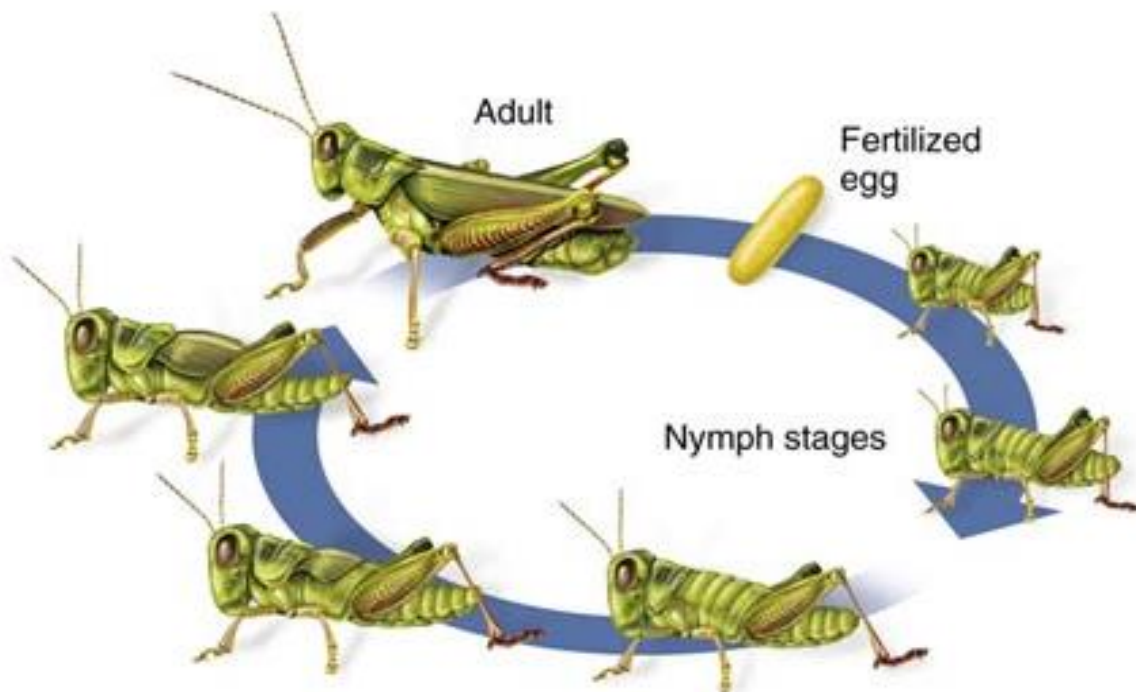


Figure 64 : Cycle de vie d'un orthoptère (métamorphose incomplète)

Source : <http://passion-entomologie.fr/metamorphose-chez-les-insectes>

3. Différents types d'élevage :

- **Elevages in-situ (en semi-liberté) :**

Ce sont des élevages effectués dans l'habitat naturel des insectes. Cependant, ce type d'élevages ne permet de subvenir qu'à l'alimentation d'un certain nombre de personnes puisqu'elle dépend de l'environnement, des conditions climatiques, des prédateurs etc. De plus, ce sont des élevages à taille humaine qui ne peuvent être utilisés pour l'industrie.

- **Elevage ex-situ (élevage dans des conditions différentes du milieu naturel) :**

Les insectes sont élevés dans des conditions différentes du milieu naturel ce qui permet une production intensive et contrôlée. La domestication des insectes peut être totale ou en semi-liberté.

Ici on peut l'exemple d'une entreprise toulousaine : Micronutris qui commercialise depuis 2011 des grillons et vers de farine pour l'alimentation humaine. Tous les mois, une tonne d'insecte sort de Micronutris pour être envoyé chez des sous-traitants.

Dans cet élevage de 350 mètres carrés, les grillons sont placés dans des alvéoles (Figure 65) les 6 premières semaines de leur vie. Une fois par semaine, ils sont nourris avec une alimentation 100% végétale.

Quand les grillons commencent à chanter, c'est qu'ils arrivent à terme. On va alors secouer les alvéoles pour récupérer les insectes. Une partie partira alors en reproduction. L'autre partira subira un jeûne de 48 heures afin de vider leur tube digestif avant d'être ébouillanté puis déshydraté.

Pour les vers de farine (Figure 66), le processus sera le même. Cependant, leur cycle de croissance dure 3 mois pendant lesquels les larves grossissent en se nourrissant de céréales, fruits et légumes.



Source : <https://www.lsa-conso.fr/decouvrez-l-unique-site-d-elevage-des-insectes-comestibles>



Source : <https://www.micronutris.com/fr/l-entreprise>

Figure 65: Photos d'un élevage de grillons



Source : <https://www.lsa-conso.fr/decouvrez-l-unique-site-d-elevage-des-insectes-comestibles>



Source : <https://www.micronutris.com/fr/l-entreprise>

Figure 66: Photos d'un élevage de vers de farine

4. Intérêts favorables de la consommation d'insectes :

- **Selon l'Anses (2015) :**

« (...) dans un contexte de raréfaction des ressources alimentaires, de recul en surface des terres agricoles et de forte dépendance de l'Europe en protéines pour l'alimentation animale, de nombreux industriels de l'alimentation animale ont montré un intérêt grandissant pour la valorisation des insectes comme source de protéines. Ils considèrent que l'utilisation de matières organiques - de déchets ou coproduits de l'agriculture et des industries alimentaires - pour élever des insectes pourrait s'avérer intéressante pour plusieurs raisons :

- La valorisation de produits de faible valeur (le fumier, les déchets de cuisine ou d'industries agro-alimentaires) en une source de protéines de haute valeur,
- La réduction d'importants volumes de déchets (tel le vermicompostage, c'est-à-dire la transformation en engrais naturels de déchets biodégradables par des vers de compost). (...) »

- **L'Entomoculture demande et consomme moins d'eau qu'un élevage standard :**

La viande d'élevage traditionnelle coûte de plus en plus chère à produire et de plus nécessite de grandes quantités d'eau.

En effet il faut par exemple 15000 Litres d'eau pour produire 1 Kg de viande de bœuf.

De plus, on estime que pour produire 1 kg de protéine animale, le bétail consomme environ 6 kg de protéines végétales, alors que pour produire 1 kg d'insecte, il en faut moins de 2.

Les insectes consomment donc beaucoup moins d'eau que l'élevage de bétail conventionnel et il est moins dépendant du sol que l'élevage conventionnel.

En résumé, un insecte comestible pour l'équivalent de bœuf c'est :

- 7 fois moins de végétaux.
- 50 fois moins d'eau.
- 100 fois moins de gaz à effet de serre

- Intérêt nutritionnel :

Les insectes représentent une source alimentaire intéressante en protéines, en acides gras polyinsaturés et en minéraux (fer, zinc, magnésium) :

Aliment	Micronutriments contenus dans une portion de 100g (consommés)							
	Calcium (mg)	Fer (mg)	Iode (mg)	Vitamine C (mg)	Vitamine A (mg)	Vitamine B1 (mg)	Vitamine B2 (mg)	Vitamine B3 (mg)
Bœuf	5	1,95	10	0	0	0,08	0,23	4,7
Poulet	8	0,88	6	1,1	0	0,075	0,16	6,5
Porc	7	0,8	5	0	0	0,77	0,24	5,6
Abats de bœuf	15	7,3	16	1	249	0,17	0,35	4,6
Abats de poulet	10	2,5	16	6	39,5	0,1	0,37	3,85
Abats de porc	10,5	4,8	7	6	5,5	0,27	0,47	4,2
Grillon	104	5,5	0,02	3	6,5	0,04	3,4	3,8
Abeille	30	18,5	/	10,2	25,7	/	3,2	/
Ver à soie	42	1,8	/	/	/	0,12	1,1	0,9
Larve de charançon	39,6	2,6	/	<0,01	11,3	/	2,2	/
Ténébrion meunier (coléoptère)	42,9	1,9	0,02	1,2	9,6	0,24	0,8	4,1

Tableau inspiré de Payne & Al (2016)

Figure 67: Tableau comparatif des micronutriments présents dans différents aliments

Source : <http://www.sante-et-nutrition.com/proteines-insectes/>

Les insectes sont surtout une source majeure de protéines : si l'on prend l'exemple du grillon, il contient 3 fois plus de protéines que le bœuf à poids égal.

C'est-à-dire que 100 g de grillons couvrent plus de la moitié des besoins quotidiens en protéines d'un adulte de 70 kg.

Enfin si l'on prend l'exemple des criquets : on sait qu'une dizaine de criquets cuits, soit 20 grammes, correspond à la valeur énergétique d'un bifteck de 110 g.

5. Dangers potentiels de l'entomophagie :

La consommation d'insectes peut présenter certains risques :

- microbiologiques (dus à la présence de microorganismes pathogènes tels que des parasites, virus, bactéries et des champignons)
- toxicologiques (par la présence de molécules substances toxiques fabriquées ou accumulées par l'insecte)
- nutritionnels (induits par la présence de substances anti-nutritionnelles qui interfèrent avec l'absorption des nutriments : tannins, thiaminase.)
- allergiques (prévisible en raison de l'existence d'allergènes communs (pan-allergènes) aux arthropodes, arachnides (acariens, araignées, scorpions), crustacés (homards, crevettes, crabes) et insectes)
- physiques (parties dures de l'insecte comme le dard, le rostre, etc.)

De plus, on peut retrouver aussi dans les insectes des métaux lourds, des résidus de pesticides et des mycotoxines.

- L'avis de l'Anses (Annexe 3) :



Qu'est-ce que l'ANSES ?

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter. Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaire à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont rendus publics.

Quelle est l'avis de l'ANSES sur la consommation d'insectes ?

Face aux risques sanitaires que peut induire la consommation d'insectes, l'ANSES souligne le fait qu'il faut mener des recherches complémentaires afin d'évaluer complètement des risques pour le consommateur.

L'agence a d'ailleurs effectué une expertise en juin 2014 (Annexe 3) qui se nomme « la valorisation des insectes dans l'alimentation et l'état des lieux des connaissances scientifiques sur les risques sanitaires en lien avec la consommation des insectes ».

Dans ce rapport, on retrouve :

- Les différentes caractéristiques des systèmes d'élevage avec :
 - Un dispositif de confinement strict (élevage dans des cuves ou des bacs)
 - Des conditions environnementales strictes : (une aération constante, un éclairage naturel ou artificiel est conseillé avec alternance jour/nuit, une température optimale, une hygrométrie qui doit être contrôlée afin de ne pas favoriser le développement d'acariens et de moisissures qui pourrait augmenter la mortalité.)
 - Un substrat de culture sec et rigide pour les insectes : (ciure ou copeaux de bois non traités, et/ou dispositifs en pulpe de cellulose, dérivés de papier/carton, terre cuite, etc.)
 - Une source d'eau pour l'abreuvement des insectes

- Un apport de nourriture adapté aux préférences alimentaires et aux capacités de transformation de l'espèce
- L'abattage des insectes :
 - un jeûne des individus de quelques heures à quelques jours peut parfois précéder l'abattage afin d'assurer la vidange du contenu digestif des insectes
 - il existe deux techniques d'abattage : la congélation d' au moins 24h à -18°C ou l'immersion dans l'eau bouillante de 1 à 5 minutes
- La transformation et les techniques de conservation pour l'utilisation en alimentation humaine et animale qui sont:
 - la déshydratation en four sec ventilé et à basse température
 - la friture dans de l'huile bouillante
 - le toastage
 - la lyophilisation
 - l'acidification par fermentation lactique
- Les risques que peuvent provoquer une consommation d'insectes : chimiques, physiques, allergiques et microbiologiques.

Afin d'éviter tous ces risques, l'ANSES a publié aussi des recommandations qui sont :

- D'accentuer l'effort de recherche sur les sources potentielles de dangers ;
- D'établir, au niveau communautaire, des listes positives et négatives des différentes espèces et stades de développement d'insectes pouvant ou non être consommés ;
- D'explorer la question du bien-être animal pour ces catégories d'invertébrés ;

- De définir un encadrement spécifique des conditions d'élevage et de production des insectes et de leurs produits permettant de garantir la maîtrise des risques sanitaires ;
- De fixer des mesures de prévention du risque allergique, à la fois pour les consommateurs et le personnel des entreprises produisant ces aliments.

6. Règlementation française :

Depuis le 25 Novembre 2015 (règlement (UE) 2015/2283), le parlement européen reconnaît les insectes comme « nouvel aliment » et permet donc aux entreprises de les commercialiser. Ce texte représente une évolution et donne un cadre juridique clairement défini permettant la commercialisation.

Un texte officiel a d'ailleurs été publié dans le JO du sénat français le 02 Mars 2017 afin de sécuriser la vente des insectes comme aliments. (Annexe 4)

Suite au rapport de l'ANSES, on sait que les insectes entiers et les préparations à base d'insectes sont clairement considérés comme nouveaux aliments et ne peuvent être mis sur le marché sans autorisation européenne préalable. De plus « *l'analyse complète des dangers pour les insectes en alimentation humaine doit être menée telle que préconisée dans le règlement sur les nouveaux aliments (CE) n° 258/97* »

Donc pour conclure, le sénat a décidé qu'aucune commercialisation d'insectes destinés à la consommation humaine n'est possible sans autorisation préalable de la CE sur le territoire de l'UE.

b) Modification des techniques agricoles.

1. L'agriculture moderne et ses conséquences :

L'agriculture d'aujourd'hui est une agriculture productiviste dont le principal objectif est la rentabilité et la surproduction.

Cette agriculture « capitaliste » :

- surconsomme des produits phytosanitaires nocifs pour la faune et la flore pour atteindre ses objectifs de rendements.
- déforeste à outrance pour accroître les surfaces cultivées, provoquant la destruction d'habitats d'espèces animales et végétales.
- fatigue les sols en abusant de la monoculture.
- provoque l'érosion des sols à cause de l'excès de mécanisation.
- affecte les insectes pollinisateurs et les micro-organismes régénérant les sols agricoles.
- concentre des polluants chimiques dans les chaînes alimentaires.

Depuis 1992, une prise de conscience mondiale s'est opérée et maintenant la question est : comment peut-on rendre l'agriculture compatible avec un développement durable ??

2. L'agriculture durable :

Lors de la conférence de Rio en Juin 1992, 174 pays ont ratifiés 27 principes (annexe 5) afin d'obtenir une agriculture durable permettant de nourrir l'Homme tout en respectant les écosystèmes.

Ils ont aussi défini l'agriculture durable par : « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs besoins »

Selon le texte de la conférence de Rio : « une exploitation agricole durable doit notamment répondre à plusieurs principes :

- la **viabilité**: l'exploitation agricole doit être économiquement rentable
- la «**vivabilité**» : les exploitants et salariés agricoles doivent pouvoir bénéficier de bonnes conditions de travail et d'une bonne qualité de vie
- la **transmissibilité**: l'exploitation doit pouvoir continuer à faire de l'agriculture durable même si elle change d'exploitant
- la **reproductibilité**: le modèle d'exploitation ne doit pas nuire à l'environnement même s'il est reproduit à grande échelle (...)

Les démarches d'une agriculture durable visent à sortir de la dépendance à la pétrochimie et aux intrants à fort impact environnemental (tels que les pesticides, les engrais, le soja importé etc) pour se diriger vers de nouvelles formes d'énergie, avec une rentabilité économique et le respect des ressources naturelles.

La particularité de l'agriculture durable est qu'elle se construit par les agriculteurs eux-mêmes.

- Quels sont les objectifs de l'agriculture durable :

Les grands principes sur lesquels se base l'agriculture durable sont la viabilité économique permettant des revenus décents pour les agriculteurs, l'équité sociale, en assurant un partage des richesses, des droits à produire et du pouvoir de décision et la protection de l'environnement.

L'agriculture durable est tout le contraire d'un modèle et ne se réduit pas à un cahier des charges statique ou un label. Elle s'apparente plus vers un cap, un objectif vers lequel il faut tendre.

Pour une agriculture durable, il faut se fixer plusieurs objectifs qui sont :

- promouvoir des systèmes de production autonomes et économes en intrants
- répondre aux besoins des populations
- leur garantir une production de denrées suffisante
- Donner priorité à la qualité plutôt qu'au rendement
- constituer des espaces d'échanges entre les producteurs et les citoyens
- préserver la biodiversité, les écosystèmes naturels, la santé humaine et animale.
- garantir l'équilibre du milieu naturel

- Quelles sont les actions à réaliser pour une agriculture durable?

Pour une agriculture durable, on doit réaliser des actions telles que (liste non exhaustive) :

- développer le commerce équitable
- réduire les intermédiaires entre les producteurs et les consommateurs
- veiller aux questions de santé publique
- réduire et éviter les intrants
- veiller à la condition animale
- préserver la ressource en eau et sa qualité
- protéger la biodiversité
- contribuer à la lutte contre le changement climatique
- limiter l'érosion et préserver les sols
- garantir un environnement respectueux de la santé
- préserver et mettre en valeur les paysages
- réduire les risques d'incendies et d'inondations
- etc.

- Quels sont les avantages d'une agriculture durable ?

Nous prendrons l'exemple d'une exploitation d'agriculture durable de bovins producteurs de lait où les agriculteurs ont recours au pâturage afin de nourrir les bovins.

Les animaux se nourrissent essentiellement de l'herbe des pâtures, en complément de céréales que l'agriculteurs peut aussi produire. Leurs déjections fertilisent le sol, il n'y aura donc pas d'utilisation de pesticides et pas d'investissement mécanique.

Cette technique permet aux agriculteurs d'être autonomes, ils sont aussi moins endettés puisqu'ils utilisent peu de pesticides et pas de machines.

WWF France et le Réseau CIVAM (figure 68) ont réalisé une étude en 2018 qui compare une exploitation laitière conventionnelle à une exploitation d'agriculture durable.

Cette étude a démontré un gain pour l'exploitation d'agriculture durable sur ces cinq axes :

- +10 % de valeur ajoutée par actif
- 40% de la valeur ajoutée redistribuée à la rémunération du travail, contre 30% pour les exploitations conventionnelles
- une bonne contribution à la création d'emplois
- une transmission plus aisée, une ferme convertie à l'agriculture durable étant par exemple plus accessible à des porteurs de projet d'installation sans gros capital
- 5 fois moins de recours aux pesticides, en stockant du carbone dans les prairies.

VIVRE MIEUX EN PRODUISANT MOINS

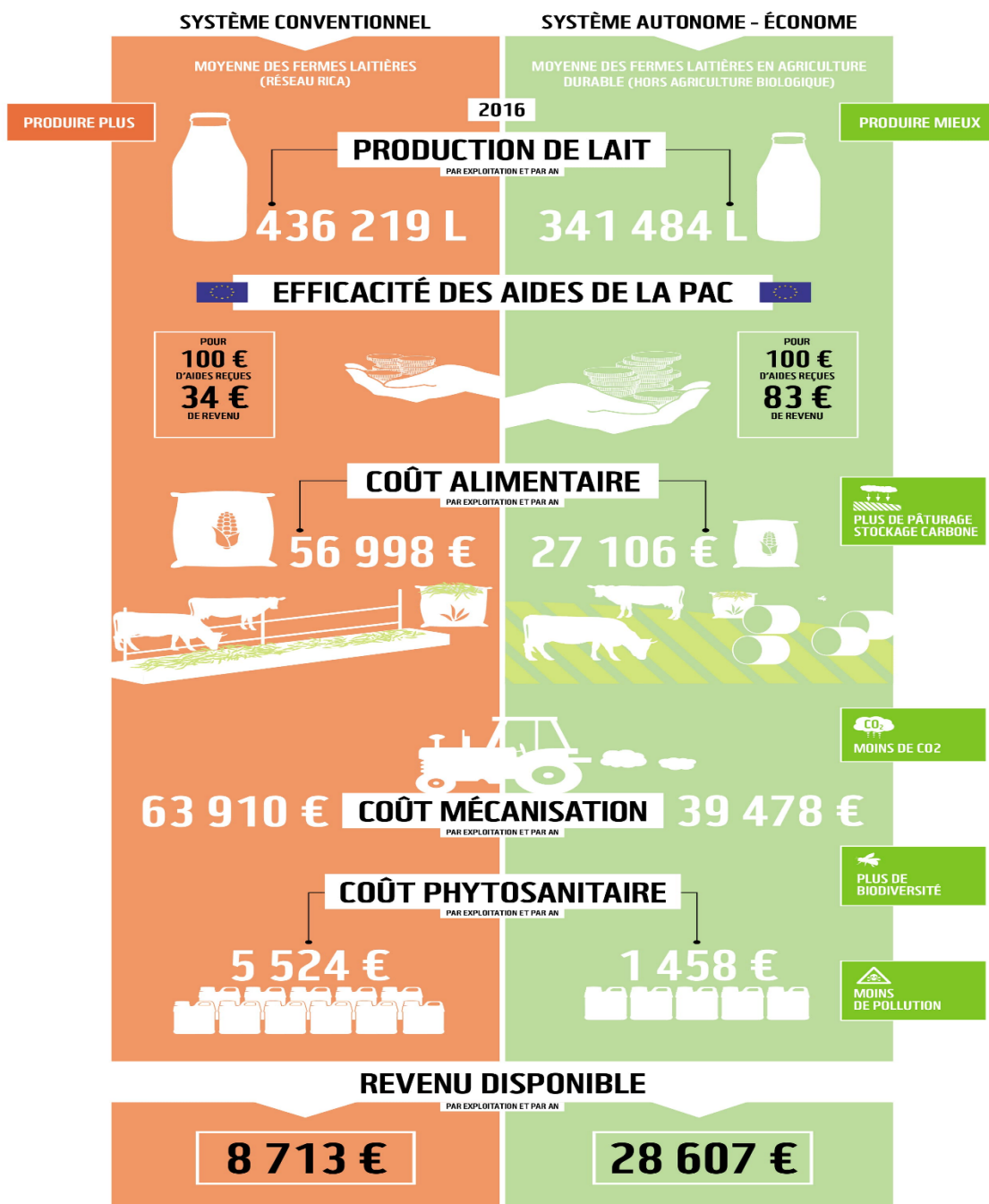


Figure 68: Comparaison d'une exploitation conventionnelle face à une exploitation d'agriculture durable

Source : <https://www.wwf.fr/champs-daction/alimentation/agriculture-durable>

- Quelles sont les limites de l'agriculture durable ?

L'agriculture durable a tout de même ses limites. En effet, les objectifs et les solutions ne peuvent pas être les mêmes partout, il y a beaucoup trop d'inégalité en fonction des espaces et du niveau de développement des pays.

CONCLUSION

La faim dans le monde touche 11% de la population mondiale. Malheureusement elle touche les population les plus pauvres vivants majoritairement dans des pays en voie de développement.

Plusieurs facteurs sont responsables de cette sous-alimentation : la pauvreté, les problèmes d'accès à l'eau potable, les conflits, le développement inégal de l'agriculture dans le monde, la prévalence des organismes phytoparasites etc.

L'agriculture ,depuis son avènement, a toujours été nécessaire pour nourrir l'Homme. Depuis la mondialisation, elle a connu beaucoup d'amélioration : modernisation du matériel et des pratiques agricoles, intensification des productions, utilisation d'intrants permettant d'éviter les pertes agricoles.

Cependant plusieurs facteurs nuisent à cette ressource de denrées essentielles à notre survie telle que la surconsommation qui entraine une agriculture intensive, utilisant des méthodes et des produits néfastes pour les écosystèmes et l'être humain.

Certaines organisations tirent la sonnette d'alarme face à cette surconsommation et cette surproduction. En effet, on détruit peu à peu nos réserves alimentaires sur terre.

Les parasites phytopathogènes engendrent aussi d'énormes pertes de façon directes ou indirectes.

En effet, outre les cultures détruites directement par les parasites, la lutte contre ces parasites s'avère difficile. Les moyens de lutte les plus efficaces sont soit très onéreux, donc inaccessibles aux « petits » agriculteurs soit très toxiques pour l'environnement.

La recherche expérimente de nouvelles méthodes alternatives pour lutter contre les nématodes phytopathogènes (plantes, champignons, bactéries etc) qui je le souhaite seront accessibles à tous les agriculteurs du monde dans un futur proche.

Seul des changements de comportements au niveau alimentaire, de la consommation, de l'agriculture, du partage des richesses... pourront avoir des conséquences bénéfiques pour l' Hommes, la faune, la flore et la planète.

En espérant qu' un jour, ces changements pourront venir à bout de ce fléau qu'est la faim dans le monde.

BIBLIOGRAPHIE

- « 1,90 Dollar Par Jour : Le Nouveau Seuil de Pauvreté Extrême - EconomieMatin ». <http://www.economiamatin.fr/news-augmentation-seuil-pauvrete-extreme-banque-mondiale-survie-revenus-pauvres>.
- « ABlanchard_these.pdf », s. d., IDENTIFICATION, POLYMORPHISME ET EVOLUTION MOLECULAIRE DE GENES DU POUVOIR PATHOGENE CHEZ LE NEMATODE A KYSTE DE LA POMME DE TERRE GLOBODERA PALLIDA
- « Agriculture : un modèle plus soutenable ». WWF France. <https://www.wwf.fr/champs-daction/alimentation/agriculture-durable>.
- « American Phytopathological Society ». American Phytopathological Society. <https://www.apsnet.org/pages/default.aspx>.
- « Apports nutritionnels des insectes comestibles en France - Europe Entomophagie ». <http://www.europe-entomophagie.com/fr/content/14-Apports-nutritionnels-des-insectes-comestibles>.
- « basf-crop-protection-l-agriculture-dans-le-monde-en-chiffres-fr.pdf », s. d.
- « Bien comprendre la faim pour lutter efficacement | Nourrir Manger ». <http://nourrir-manger.com/2017/12/21/bien-comprendre-la-faim-pour-lutter-efficacement/>.
- « BIORISK2014sa0153.pdf ». <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2014sa0153.pdf>.
- Bretagne-Normandie, Service communication Inra. « BIODERA : des produits de bio-contrôle contre les nématodes phytoparasites », 7 mars 2017. <http://www.rennes.inra.fr%2FToutes-les-actualites%2FBIODERA-des-produits-de-bio-controle-contre-les-nematodes-phytoparasites>.
- BrunoParmentier. « Bien comprendre la faim pour lutter efficacement | Nourrir Manger ». <http://nourrir-manger.com/2017/12/21/bien-comprendre-la-faim-pour-lutter-efficacement/>.
- Caravelia.com. « La métamorphose chez les insectes ». *Passion Entomologie* (blog), 13 octobre 2014. <http://passion-entomologie.fr/metamorphose-chez-les-insectes/>.
- « Combien y a-t-il de pauvres ? » *ATD Quart Monde International* (blog). <http://www.atd-quartmonde.org/faq/combien-y-a-t-il-de-pauvres/>.
- Corson, M S, et M Doreau. « Évaluation de l'utilisation de l'eau en élevage », 2013, 10.
- Coyne, Danny L., Laura Cortada, Johnathan J. Dalzell, Abiodun O. Claudius-Cole, Solveig Haukeland, Nessie Luambano, et Herbert Talwana. « Plant-Parasitic Nematodes and Food Security in Sub-Saharan Africa ». *Annual*

- Review of Phytopathology* 56, n° 1 (25 août 2018): 381-403.
<https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-045833>.
- Dallaire, Cindy, et Gérard Gilbert. « QUELQUES STATISTIQUES CONCERNANT LES NÉMATODES ! », s. d., 9.
- « De la jachère sèche au semis direct - A2C le site de l'agriculture de conservation ». <http://agriculture-de-conservation.com/De-la-jachere-seche-au-semis.html>.
- « Découvrez l'unique site d'élevage des insectes comestibles ». lsa-conso.fr.
<https://www.lsa-conso.fr/decouvrez-l-unique-site-d-elevage-des-insectes-comestibles,179092>.
- « Définitions de la pauvreté - Le site du CNLE ». <https://www.cnle.gouv.fr/definitions-de-la-pauvrete.html>.
- « Désinfection des sols : méthode saine et naturelle ». *Simox : Générateurs de vapeur basse pression* (blog). <http://www.simox.fr/desinfection-des-sols/>.
- Djian-Caporalino, C. « Root-Knot Nematodes (*Meloidogyne* Spp.), a Growing Problem in French Vegetable Crops: Root-Knot and Cyst Nematodes in France ». *EPPO Bulletin* 42, n° 1 (avril 2012): 127-37.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2012.02530.x>.
- Djian-Caporalino, Caroline. « des ravageurs de plus en plus préoccupants », 2010, 7.
- « INNOVATIONS TECHNIQUES ET VARIETALES POUR UNE GESTION DURABLE ET INTEGREE DES NÉMATODES A GALLES DANS LES SYSTEMES MARAICHERS SOUS ABRIS », s. d., 153.
- Djian-Caporalino, Caroline, et Hélène Védie. « l'atout des plantes pièges », 2009, 5.
- « Djian-Caporalino, et al. Phytoma 2009 avec photos v6.pdf », s. d.
- « FAO - La faim dans le monde en 2009 - PopulationData.net ». Consulté le 5 septembre 2018. <https://www.populationdata.net/cartes/fao-la-faim-dans-le-monde-en-2009/>.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *L'ETAT DE LA SECURITE ALIMENTAIRE ET DE LA NUTRITION DANS LE MONDE 2017: renforcer la... resilience pour favoriser la paix et la securite a*. S.l.: FOOD & AGRICULTURE ORG, 2017.
- Gouvernement du Canada, Agence canadienne d'inspection des aliments. « Nématode à kystes pâles - *Globodera pallida* ». Fiche de renseignements, matériel de référence, 14 mai 2012.
<http://www.inspection.gc.ca/vegetaux/phytoravageurs-especes-envahissantes/nematodes-autres/nematode-a-kystes-pales/fra/1337002354425/1337002587229>.

- Hance, Thierry, Kayisu Kalenga, Yvan Larondele, Faculté de Bioingénieurs, Claude Bragard, et Facultés de Bioingénieurs. « Thèse présentée par Jean Claude Monzenga Lokela en vue de l'obtention du grade de docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique, février 2015. », s. d., 216.
- Huis, Arnold van, éd. *Insects comestibles: perspectives pour la sécurité alimentaire et l'alimentation animale*. Etude FAO forêts 171. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014.
- Industries, CM Regero. « CM Regero Industries - Maraîchage / Horticulture : Désinfection des sols par la vapeur ». Text, 2 août 2012. <http://www.cm-regero-industries.fr/module-Contenus-viewpub-tid-2-pid-12.html>.
- « Interactions entre pesticides systémiques et abeilles », s. d., 2.
- « La consommation d'insectes ou de protéines d'insectes en Europe - Afis - Association française pour l'information scientifique ». <https://www.pseudo-sciences.org/spip.php?article2957>.
- « La faim dans le monde augmente pour la première fois depuis dix ans ». Reporterre, le quotidien de l'écologie. <https://reporterre.net/La-faim-dans-le-monde-augmente-pour-la-premiere-fois-depuis-dix-ans>.
- « La vapeur ». http://biosol.free.fr/liens/patho_2004/lutte/la_vapeur.htm.
- « Les grandes lignes de la classification phylogénétique des Métazoaires — Site des ressources d'ACCES pour enseigner la Science de la Vie et de la Terre ». <http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/evolution/rerelations-de-parente/comprendre/les-grandes-lignes-de-la-classification-phylogenetique-des-metazoaires#eumeta>.
- « Les insectes : l'alimentation du futur ». Visions Mag, 7 septembre 2016. <http://visionsmag.com/insectes-l'alimentation-futur/>.
- « Les solutions contre la faim dans le monde ». <http://faimdanslemonde.e-monsite.com/pages/quelles-solutions-pour-la-faim-dans-le-monde.html>.
- « Manuscrit_NGarcia_finalpostsoutenance_CouvAO.pdf », s. d., Analyse exploratoire des variables structurant la capacité des communautés de nématodes phytoparasites à limiter l'implantation du nématode de quarantaine *Meloidogyne chitwoodi*
- Mazoyer, Marcel. « La situation agricole et alimentaire mondiale : causes, conséquences, perspectives ». *Oléagineux, Corps gras, Lipides* 15, n° 6 (novembre 2008): 385-90. <https://doi.org/10.1051/ocl.2008.0233>.
- « Meloidogyne (Définition) - Nematodes.be ». Consulté le 24 janvier 2019. <http://www.nematodes.be/fr/definition/definition-meloidogyne/>.
- « Micronutris : 1ère ferme d'élevage d'insectes comestibles France ». Micronutris. <http%3A%2F%2Fwww.micronutris.com%2Ffr%2Fentreprise>.

- Morineau, Jacques. « PRÉSIDENT DU RAD (RÉSEAU AGRICULTURE DURABLE). », s. d., 24.
- « Nématicides Flocter® : Bayer-Agri, traitement phytopharmaceutique pour la protection des cultures - Flocter® ». https://www.bayer-agri.fr/produits/fiche/nematicides-flocter/#top_etape_telechargement_produit-2-confirmation_1.
- « Nematodes: The Worm and Its Relatives ». *PLOS Biology* 9, n° 4 (19 avril 2011): e1001050. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001050>.
- NETSCHER, C. « Les nématodes parasites des cultures maraîchères au Sénégal », s. d., 21.
- Peloille, Michèle. « les Hyphomycètes prédateurs de Nématodes : phénomène de prédation ; écologie ; utilisation en lutte biologique ». *Agronomie* 1, n° 4 (1981): 331-37. <https://doi.org/10.1051/agro:19810411>.
- « plaquette-nematodes-pdt.pdf ». <https://www.fredon-lorraine.com/UserFiles/File/onr/nematodes-ppt/plaquette-nematodes-pdt.pdf>.
- « Règlement (CE) no 1107/2009 du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques et abrogeant les directives 79/117/CEE et 91/414/CEE du Conseil », s. d., 50.
- « Réglementation de la commercialisation des insectes comestibles - Sénat ». <https://www.senat.fr/questions/base/2016/qSEQ160521626.html>.
- REGNAULT-ROGER, PHILOGENE, et VINCENT. *Biopesticides d'origine végétale* (2e éd.). Lavoisier, 2008.
- « Réseau agriculture durable » Qu'est-ce que c'est ? » <http://www.agriculture-durable.org/lagriculture-durable/quest-ce-que-cest/>.
- Sebillotte, Michel, Sophie Allain, Thierry Doré, et Jean Marc Meynard. « la jachère et ses fonctions agronomiques, économiques et environnementales diagnostic actuel », s. d., 12.
- « SOFI 2017 - L'état de la Sécurité Alimentaire et de la Nutrition dans le Monde ». <http://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition/fr/>.
- Sorel, Benoît R. *L'élevage professionnel d'insectes: Points stratégiques et méthode de conduite*. BoD - Books on Demand, 2016.
- « Surveillance et contrôles de l'utilisation de produits phytosanitaires (pesticides) | Alim'agri ». <http://agriculture.gouv.fr/surveillance-et-controles-de-lutilisation-de-produits-phytosanitaires-pesticides>.
- « thèse C. ALENDA.pdf », s. d., Variabilité des nématodes à kystes du tabac (*Globotera tabacum*) et efficacité des résistances identifiées dans le genre *Nicotiana*

« Thèse Damien Picard.pdf », s. d., GÉNÉTIQUE DES POPULATIONS ET
PHYLOGÉOGRAPHIE DU NÉMATODE À KYSTE DE LA POMME DE TERRE (*Globodera
pallida*) AU PÉROU

« Thèse Nadine Ali | Ecosystem | Life Sciences ». Scribd.

<https://fr.scribd.com/document/332448715/These-Nadine-Ali>.

Communautés de nématodes phytoparasites associés à l'olivier : réponse aux forçages
anthropiques et environnementaux

« Tomate - Principaux symptômes ». [http://ephytia.inra.fr/fr/C/5275/Tomate-
Principaux-symptomes](http://ephytia.inra.fr/fr/C/5275/Tomate-Principaux-symptomes).

« VapamHLFRLLabel2014.pdf ». [http://www.uap.ca/francais/products/documents/
VapamHLFRLLabel2014.pdf](http://www.uap.ca/francais/products/documents/VapamHLFRLLabel2014.pdf).

ANNEXES

ANNEXE 1 : Fiche sécurité du FLOCTER



Flocter®

Solution de biocontrôle pour la lutte contre les nématodes en traitement des sols sur carotte, aubergine, concombre, courgette, melon, pastèque, poivron, tomate, tabac, laitue, scarole, frisée, mâche, roquette et autres salades.

Conditionnement(s)

Fiched'identité

Composition:

Formulation: poudre mouillable

Numéro AMM: 2120069

Détenteur d'homologation: Bayer SAS
Division Crop Science - 16, rue Jean-Marie
Leclair - CS 90106 - 69266 Lyon Cedex 09
France

Substance Organique: bacillus firmus
I-1582

Teneur: 50 g/kg, soit 5% (m/m)

Organisme: bactérie

Moded'action: Production d'une protéase
exogène qui perfore les parois des œufs de
nématodes. D'autres voies d'action restent à
clarifier.

Description

FLOCTER est un nématicide d'origine naturelle, contenant 5% de *Bacillus firmus*, destiné au traitement du sol pour contrôler les nématodes sur culture de carotte, concombre, laitue, melon, poivron, tomate, tabac et leurs cultures rattachées.

FLOCTER agit principalement sur la dégradation des parois des œufs de nématodes, entraînant la mort des larves J1, ainsi que sur la réduction d'attractivité des racines de carotte pour les larves J2.

FLOCTER est utilisable en agriculture biologique.

Préparation

Préparation du sol et de la culture

Pour les applications au sol, FLOCTER s'applique avant la plantation ou le semis sur sol nu mais travaillé, de préférence humide et réchauffé. La pulvérisation doit être suivie d'une incorporation superficielle immédiate à une profondeur de 5 cm environ.

Préparation de la bouillie

Préparation de la bouillie:

Il est recommandé que la température de l'eau soit supérieure à 10°C (phénomène d'endothermie possible).

Application par pulvérisation:

Utiliser un minimum de 5 L d'eau par KG de produit (400 L minimum pour la dose préconisée de 80 KG/HA).

La préparation doit se faire dans un pulvérisateur en bon état de fonctionnement, nettoyé et ne contenant aucun résidu de bouillie d'une pulvérisation précédente (nettoyer le pulvérisateur avec un produit autorisé pour cet usage).

Remplir aux 3/4 d'eau la cuve du pulvérisateur, mettre en route et agiter net verser progressivement dans la cuve la quantité de produit nécessaire.

Terminer le remplissage de la cuve et maintenir l'agitation jusqu'à la fin de l'application.

Application goutte à goutte ou par arrosage localisé:

Quelques soit le matériel ou les systèmes utilisés, la préparation et l'utilisation de Flocter doivent se faire dans un matériel en bon état de fonctionnement, nettoyé et ne contenant aucun résidu de bouillie de l'application précédente. Il est donc important de bien nettoyer les différents éléments destinés à l'application (cuve, système de goutte à goutte, ...) avant utilisation de Flocter. Le volume d'eau préconisé est de 3000 à 6000 L/ha.

Mélanges et compatibilité 171

Il est recommandé de ne pas mélanger FLOCTER.

Les mélanges doivent être mis en œuvre conformément à la réglementation en vigueur. Pour connaître le détail pratique de cette mise en œuvre, il est nécessaire de contacter au préalable le 0800 253545

Traitement

Voir en fin de fiche, après le Tableau des usages

Après traitement

Voir en fin de fiche, après le Tableau des usages

Précautions à prendre

Pour le stockage

- Conserver le produit dans son emballage d'origine, dans des locaux fermés à clé, à l'écart de tout aliment et boisson y compris ceux pour les animaux, et hors de portée des enfants. Les locaux doivent être frais et ventilés.

Mesures de protection des individus

Pour l'opérateur, porter:
pendant le mélange/chargement
- Gants nitrile certifiés EN 374-3;
- Combinaison de travail tissée en polyester 65 %/coton 35% avec un grammage de 230g/m² ou plus avec traitement déperlant;
- Demi-masque filtrant à particules (EN 149) ou un demi-masque (EN 140) équipé d'un filtre à particules P3 (EN 143);
- Bottes de protection conforme à la réglementation et selon la norme EN 13832-3;
- Lunettes ou écran facial certifié norme EN 166 (CE, sigle 3), pendant l'application
Usages en plein champ.
Pulvérisation vers le bas (tabac, carotte)
Si application avec tracteur avec cabine:
- Combinaison de travail en polyester 65%/coton % avec un grammage d'au moins 230g/m² avec traitement déperlant; 35
- Bottes de protection conforme à la réglementation et selon la norme EN 13832-3;
- Gants nitrile certifiés EN 374-2 à usage unique, dans le cas d'une intervention sur le matériel pendant la phase de pulvérisation. Dans ce cas, les gants ne doivent être reportés qu'à l'extérieur de la cabine et doivent être stockés après utilisation à l'extérieur de la cabine.
Si application avec tracteur sans cabine:
- Combinaison de travail en polyester 65%/coton % avec un grammage d'au moins 230g/m² avec traitement déperlant; 35
- Bottes de protection conforme à la réglementation

norme EN 13 832-3 ;

- Gants en nitrile certifiés EN 374-2 à usage unique, dans le cas d'une intervention sur le matériel pendant la phase de pulvérisation; - En cas d'exposition aux gouttelettes pulvérisées, porter un demi-masque filtrant à particules (EN 149) ou un demi-masque (EN 140) équipé d'un filtre à particules P3 (EN 143). Arrosage (solanacées, cucurbitacées)

- Combinaison de travail en polyester 65 %/coton 35 % avec un grammage de 230 g/m2 ou plus avec

traitement déperlant ; - Bottes de protection certifiées EN 13 832-3 ;

- Gants en nitrile certifiés EN 374-3 - Demi-masque filtrant à particules(EN 149) ou un demi-masque (EN 140) équipé d'un filtre à particules P3 (EN 143).

Usages sous serre.

Arrosage (solanacées, cucurbitacées)

- Combinaison de travail en polyester 65 %/coton 35 % avec un grammage de 230 g/m2 ou plus avec

traitement déperlant ; - Bottes de protection certifiées EN 13 832-3 ;

- Gants en nitrile certifiés EN 374-3 ; - Demi-masque filtrant à particules(EN 149) ou un demi-masque (EN 140) équipé d'un filtre à particules P3 (EN 143) ; pendant le nettoyage du matériel de pulvérisation - Gants en nitrile certifiés EN 374-3 ;

- Combinaison de travail tissée en polyester 65 %/coton 35 % avec un grammage de 230 g/m2 ou

plus avec traitement déperlant ; - EPI partiel (blouse ou tablier à manches longues) de catégorie III et de type PB (3) à porter par-dessus la combinaison précitée; - Lunettes ou écran facial certifié norme EN 166

(CE, sigle 3) ;

- Demi-masque filtrant de catégorie FFP3 certifié EN 149 ou un demi-masque (EN 140) équipé d'un filtre à particules P3 (EN 143). - Pour protéger le travailleur, porter une combinaison de travail tissée en polyester 65 % coton 35 % avec un grammage de 230 g/m2 ou plus avec traitement déperlant.

Pour l'emploi

- Eliminer les fonds de cuve conformément à la réglementation en vigueur.

Pour l'élimination du produit et de l'emballage

- Pour l'élimination des produits non utilisables, faire appel à une entreprise habilitée pour la collecte et l'élimination des produits dangereux. - Ne pas réutiliser les emballages vides et les éliminer via une collecte organisée par les distributeurs partenaires de la filière Adivalor ou un autre service de collecte spécifique.

Classes de danger



Important

Respecter les usages, doses, conditions et précautions d'emploi mentionnés sur l'emballage qui ont été déterminés en fonction des caractéristiques du produit et des applications pour lesquelles il est préconisé. Conduisez sur ces bases, la culture et les traitements selon la bonne pratique agricole en tenant compte, sous votre responsabilité, de tous facteurs particuliers concernant votre exploitation, tels que la nature du sol, les conditions météorologiques, les méthodes culturales, les variétés végétales, la résistance des espèces...

Le fabricant garantit la qualité de ses produits vendus dans leur emballage d'origine ainsi que leur conformité à l'autorisation de mise sur le marché. Compte tenu de la diversité des législations existantes, il est recommandé, dans le cas où les denrées issues des cultures protégées avec cette spécialité sont destinées à l'exportation, de vérifier la réglementation en vigueur dans le pays importateur.

Toxicologie

Classement du mélange CLP

H319 - Provoque une sévère irritation des yeux.
Attention



P280 - Porter des gants de protection/des vêtements de protection/un équipement de protection des yeux/du visage.
P337+P313 - Si l'irritation oculaire persiste : consulter un médecin.
P501 - Eliminer le contenu/récipient dans le lieu d'élimination conformément à la réglementation locale.
SPe3 - Pour protéger les organismes aquatiques, respecter une zone non traitée de 5 mètres par rapport aux points d'eau.

Délai de rentrée des travailleurs dans la zone traitée

Non pertinent en plein champ et 8 heures sous abri ou port de masque en cas de rentrée plus précoce en application.

Substance classée sensibilisante

Contient du *Bacillus firmus*. Peut entraîner une réaction de sensibilisation.

Se reporter impérativement au paragraphe de l'étiquette intitulé Précautions à prendre.

SP1 - Ne pas polluer l'eau avec le produit ou son emballage.

Respectez les instructions d'utilisation afin d'éviter les risques pour la santé humaine et l'environnement.

Information santé

Premiers secours

Conseils généraux : S'éloigner de la zone dangereuse. Maintenir et transporter la victime en position latérale de sécurité. Enlever immédiatement tout vêtement souillé et le mettre à l'écart.

Inhalation:

Amener la victime à l'air libre. Garder la victime au repos et la maintenir au chaud. Appeler immédiatement un médecin ou un centre AntiPoison.

Contact avec la peau: Nettoyer avec une grande quantité d'eau et du savon, si disponible, avec du polyéthylène glycol 400, puis rincer avec de l'eau. Si les troubles se prolongent, consulter un médecin.

Contact avec les yeux: Rincer immédiatement et abondamment à l'eau, y compris sous les

paupières, pendant au moins 15 minutes. Après les 5 premières minutes, enlever les lentilles cornéennes, si présentes, continuer à rincer l'oeil. En cas d'irritation ou de rougeur persistante, consulter un ophtalmologiste.

Ingestion:

Rincer la bouche. Ne PAS faire vomir. Appeler immédiatement un médecin ou un centre AntiPoison.

En cas de perte de la Fiche de données de sécurité, celle-ci peut vous être à nouveau fournie sur simple appel au 0 800 25 35 45 ou être consultée sur les sites internet : www.bayer-agri.fr et www.quickfds.com. En cas d'urgence, appeler le 15 ou le centre antipoison puis signalez vos symptômes au réseau "Phyt'attitude" n° vert 0 800 887 887 (appel gratuit depuis un poste fixe).

Transport et Stockage

Point gélif : 20°C

Température maximum : 30°C

N°ONU : -

Tableau des usages et doses autorisées

Culture	Cibles / Usages	Doses	Spécifications d'usage / Stade d'application	DAR (en jours) ou ou BBCH max ou NC (Non Concerné)	Précautions environnement (voir légendes)
Panais	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Cerfeuil tubéreux	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Aubergine	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Carotte	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Concombre	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Courgette	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Laitue	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Melon	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Poivron	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Scarole	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Scorsonère-salsifis	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Tabac	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Tomate	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Frisée	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Céleri rave	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Mâche	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Pastèque	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Potiron	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Roquette	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Autres salades	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Crosne	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Persil à grosse racine	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a

Raifort	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a
Topinambour	Nématodes	80.0kg/ha	1 trait./an	NC	1a

La dose peut être fractionnée : - 1 x 40 kg/ha 10 à 0 jours avant semis et 40 kg/ha en post-semis/pré-levée pour la carotte- 1 x 40 kg/ha 10 à 0 jour avant transplantation et 40 kg/ha 5 à 10 jour après transplantation pour l'aubergine, le concombre, la courgette, le melon, le potiron, la pastèque, le poivron, la tomate, le tabac.

Limites maximales en résidus de substances actives : se reporter aux LMR en vigueur au niveau de l'Union Européenne et consultables à l'adresse : <http://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database>

Bayer SAS ne préconise l'utilisation de ce produit que sur les cultures et usages mentionnés dans le tableau des usages ci-dessus et, à ce titre, décline toute responsabilité concernant l'élargissement de son utilisation à d'autres usages tels que prévus par l'arrêté du 26 mars 2014 et ses arrêtés modificatifs.

1. Organismes aquatiques

1a. . Pour protéger les organismes aquatiques, respecter une zone non traitée de 5 mètres par rapport aux points d'eau.

Si ZNT aquatique non fixée (en l'absence sur l'étiquette de zone non traitée par rapport aux points d'eau), respecter, selon les dispositions de l'arrêté du 4 mai 2017, la valeur minimale suivante : Zone non traitée 5 mètres.

Champ d'activité

Nématodes à galles (principalement *Meloidogyne incognita* et *M.hapla*) nématodes à kystes (principalement *Heterodera carotae*) et nématodes à lésions (principalement *Pratylenchus spp.*)

Traitement

Dose(s) préconisée(s)

La dose préconisée est identique à la dose homologuée, soit 80 KG/HA

Conditions de traitement (époque, stade, seuil d'intervention)

Pour la carotte, le céleri-rave, le crosne, le panais, le persil à grosse racine, le raifort, le scorsonère-salsifis, le topinambour et le cerfeuil tubéreux : application par pulvérisation sur sol nu, préparé, en pleine surface entre 10 et 0 jours avant le semis de la culture avec incorporation immédiate sur une profondeur de 5 à 10 centimètres.

Dans le cas de fractionnement, uniquement sur carotte, la 2ème application est réalisée avec incorporation par irrigation.

Pour l'aubergine, le concombre, la courgette, le melon, la pastèque, le poivron et la tomate : application par goutte à goutte ou par arrosage localisé sur la zone de plantation entre 10 et 0 jours avant la plantation de la culture sans incorporation.

Pour le tabac, application par pulvérisation en bande de 30 à 40 cm sur sol nu entre 10 et 0 jours avant la plantation de la culture avec incorporation immédiate sur une profondeur de 5 à 10 centimètres.

Dans le cas de fractionnement, la 2ème application est réalisée par goutte à goutte ou pas arrosage localisé.

Pour la laitue et les autres salades: Application par pulvérisation sur sol nu, préparé, en pleine surface entre 10 et 0 jours avant le semis de la culture avec incorporation immédiate sur une profondeur de 5 à 10 centimètres. Ou application par goutte à goutte ou par arrosage localisé sur la zone de plantation entre 10 et 0 jours avant la plantation de la culture sans incorporation.

Pour le tabac, application par pulvérisation sur sol nu entre 10 et 0 jours avant la plantation de la culture avec incorporation immédiate sur une profondeur de 5 à 10 centimètres.

Dans le cas de fractionnement, la 2ème application est réalisée par goutte à goutte ou par arrosage localisé.

Attention : en cas de recours à des techniques culturales nouvellement mises en oeuvre par l'utilisateur ou présentant une quelconque spécificité, l'utilisateur doit en informer son fournisseur avant toute utilisation du produit, afin que ce dernier puisse en vérifier la faisabilité avec le fabricant du produit.

Programme de traitement

FLOCTER peut être appliqué en fractionnement de la dose de 80 KG/HA :

Pour la carotte, le céleri-rave, le crosne, le panais, le persil à grosse racine, le raifort, le scorsonère-salsifis, le topinambour et le cerfeuil tubéreux 40 KG/HA entre 10 et 0 jours avant le semis avec incorporation et 40 KG/HA entre 5 et 10 jours après le semis sans incorporation mais avant l'émergence de la culture.

Lors de l'application en pré-émergence, il est recommandé de procéder à une aspersion significative, dépendant du type de sol et de sa capacité de rétention afin de favoriser la levée de la culture et le développement de *Bacillus firmus* dans le sol.

Pour l'aubergine, le concombre, la courgette, le melon, la pastèque, le poivron, la tomate et le tabac 1 x 40 kg/ha 10 à 0 jours avant plantation et 40 kg/ha 5 à 10 jours après transplantation sans incorporation.

Application (matériel, pression)

Pour la carotte, le céleri-rave, le crosne, le panais, le persil à grosse racine, le raifort, le scorsonère-salsifis, le topinambour et le cerfeuil tubéreux: : application par pulvérisation en plein avec un matériel classique.

Le produit appliqué avant semis doit toujours être incorporé superficiellement avec un matériel adapté.

Pour l'aubergine, le concombre, la courgette, le melon, la pastèque, le poivron et la tomate : application par goutte à goutte ou par arrosage localisé sur la zone de plantation.

Pour le tabac, 1ère application par pulvérisation en bande avec un matériel classique et 2ème application est réalisée par goutte à goutte ou pas arrosage localisé. Pour la laitue et les autres salades: Application par pulvérisation en plein avec un matériel classique suivie d'une incorporation par du matériel adapté ou application par goutte à goutte ou par arrosage localisé sur la zone de plantation.

Conditions du milieu

Application sur sol de préférence humide et suffisamment réchauffé. Le maintien de l'humidité du sol est un facteur contribuant à l'efficacité de FLOCTER.

ANNEXE 2 : Fiche sécurité du FLOCTER

conformément au Règlement

Date de révision: 20.07.2018
Date d'impression: 20.07.2018

RUBRIQUE 1: IDENTIFICATION DE LA SUBSTANCE/DU MÉLANGE ET DE LA SOCIÉTÉ/L'ENTREPRISE

1.1 Identificateur de produit Nom commercial FLOCTER **Code du produit (UVP)** 80240511, 84893153

1.2 Utilisations identifiées pertinentes de la substance ou du mélange et utilisations déconseillées

Utilisation Insecticide, Nématicide

1.3 Renseignements concernant le fournisseur de la fiche de données de sécurité

Fournisseur Bayer S.A.S.
Bayer CropScience
16, rue Jean Marie Leclair
69009 Lyon
France

Service responsable E-mail : fds-france@bayer.com

1.4 Numéro de téléphone d'appel d'urgence Numéro de téléphone +33(0)4.72.85.25.25 d'appel d'urgence

Numéro INRS +33(0)1.45.42.59.59

RUBRIQUE 2: IDENTIFICATION DES DANGERS

2.1 Classification de la substance ou du mélange

Classement conformément au Règlement (CE) N° 1272/2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges, et à ses amendements.

Irritation oculaire: Catégorie 2

H319 Provoque une sévère irritation des yeux.

2.2 Éléments d'étiquetage

Etiquetage conformément au Règlement (CE) no 1272/2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges, et à ses amendements.

Soumis à étiquetage réglementaire.

Composants dangereux qui doivent être listés sur l'étiquette:

- Bacillus firmus (Strain I-1582)

(contient 7.1×10^{10} CFU par gramme)



Mention d'avertissement: Attention
conformément au Règlement

Date de révision: 20.07.2018

Date d'impression: 20.07.2018

Mentions de danger

H319 Provoque une sévère irritation des yeux.

EUH401 Respectez les instructions d'utilisation pour éviter les risques pour la santé humaine et l'environnement.

Contient du Bacillus firmus. Peut entraîner une réaction de sensibilisation.

Conseils de prudence

P280 Porter des gants de protection/ des vêtements de protection/ un équipement de protection des yeux/ du visage.

P337 + P313 Si l'irritation oculaire persiste: consulter un médecin.

P501 Éliminer le contenu/récipient dans le lieu d'élimination conformément à la réglementation locale.

2.3 Autres dangers

Les micro-organismes peuvent avoir le potentiel de provoquer des réactions de sensibilisation.

RUBRIQUE 3: COMPOSITION/INFORMATIONS SUR LES COMPOSANTS

3.2 Mélanges Nature chimique

Poudre mouillable (WP)

Bacillus firmus I-1582 WP 5 % w/w

Composants dangereux

Mentions de danger conformément au Règlement (CE) No. 1272/2008

Nom	No.-CAS / No.-CE / REACH Reg. No.	Classification	Conc. [%]
		RÈGLEMENT (CE) No 1272/2008	
Bacillus firmus (Strain I-1582) (contient 7.1×10^{10} exp10 CFU par gramme)		Non classé	5,00
Chlorure d'ammonium	12125-02-9 235-186-4 01-2119487950-27- xxxx	Acute Tox. 4, H302 Eye Irrit. 2, H319	> 1 – < 25

Information supplémentaire

Pour le texte complet des Phrases-H mentionnées dans ce chapitre, voir section 16.

RUBRIQUE 4: PREMIERS SECOURS

4.1 Description des premiers secours

Conseils généraux	S'éloigner de la zone dangereuse. Maintenir et transporter la victime en position latérale de sécurité. Enlever immédiatement tout vêtement souillé et le mettre à l'écart.
Inhalation	Amener la victime à l'air libre. Garder la victime au repos et la maintenir au chaud. Si les troubles se prolongent, consulter un médecin.
Contact avec la peau	Laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et du savon.
Contact avec les yeux	Rincer immédiatement et abondamment à l'eau, y compris sous les paupières, pendant au moins 15 minutes. Après les 5 premières minutes, enlever les lentilles cornéennes, si présentes, continuer à rincer l'oeil. En cas d'irritation ou de rougeur persistante, consulter un ophtalmologiste.
Ingestion	Rincer la bouche et faire boire de l'eau par petites gorgées. Ne PAS faire vomir. Si les troubles se prolongent, consulter un médecin.

4.2 Principaux symptômes et effets, aigus et différés

Symptômes	Aucun symptôme connu ou attendu.
------------------	----------------------------------

4.3 Indication des éventuels soins médicaux immédiats et traitements particuliers nécessaires

Traitement Traiter de façon symptomatique. Il n'existe pas d'antidote spécifique.

RUBRIQUE 5: MESURES DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE

5.1 Moyens d'extinction

Appropriés Utiliser de l'eau pulvérisée, de la mousse résistant à l'alcool, de la poudre d'extinction ou du dioxyde de carbone.

Inappropriés Jet d'eau à grand débit

5.2 Dangers particuliers résultant de la substance ou du mélange En cas d'incendie il y a dégagement de gaz dangereux.

5.3 Conseils aux pompiers

Équipements de protection particuliers des pompiers En cas d'incendie et/ou d'explosion, ne pas respirer les fumées. En cas d'incendie, porter un appareil de protection respiratoire autonome.

Information supplémentaire Limiter l'épandage des fluides d'extinction. Ne pas laisser pénétrer l'eau d'extinction contaminée dans les égouts ou les cours d'eau.

RUBRIQUE 6: MESURES À PRENDRE EN CAS DE DISPERSION ACCIDENTELLE

6.1 Précautions individuelles, équipement de protection et procédures d'urgence

Précautions Eviter tout contact avec le produit répandu ou les surfaces contaminées. Ne pas manger, boire ou fumer pendant l'intervention sur un déversement de produit. Utiliser un équipement de protection individuelle.

6.2 Précautions pour la protection de Ne pas déverser dans les eaux de surface, les égouts et les eaux souterraines.

l'environnement

6.3 Méthodes et matériel de confinement et de nettoyage

Méthodes de nettoyage Utiliser un équipement de manutention mécanique. Nettoyer à fond les objets et le sol souillés en respectant la réglementation sur l'environnement. Conserver dans des récipients adaptés et fermés pour l'élimination.

Conseils supplémentaires Vérifier également l'existence de procédures internes au site.

6.4 Référence à d'autres rubriques Informations concernant la manipulation, voir section 7. Informations concernant les équipements de protection individuelle, voir section 8. Informations concernant l'élimination, voir section 13.

RUBRIQUE 7: MANIPULATION ET STOCKAGE

7.1 Précautions à prendre pour une manipulation sans danger

Conseils pour une manipulation sans danger Éviter la formation de poussière. Utiliser uniquement en zone pourvue d'une ventilation avec extraction d'air appropriée.

Mesures d'hygiène Éviter le contact avec la peau, les yeux et les vêtements. Entreposer séparément les vêtements de travail. Après le travail, se laver aussitôt

les mains et éventuellement prendre une douche. Enlever immédiatement tout vêtement souillé et le mettre à l'écart.

7.2 Conditions d'un stockage sûr, y compris d'éventuelles incompatibilités

Exigences concernant les aires de stockage et les conteneurs Conserver dans le conteneur d'origine. Garder les récipients bien fermés dans un endroit sec, frais et bien ventilé. Entreposer dans un endroit accessible seulement aux personnes autorisées.

Précautions pour le stockage en commun Conserver à l'écart des aliments et boissons, y compris ceux pour animaux.

Matériau approprié Film alu composé (épaisseur Alu min 0,007 mm)

7.3 Utilisation(s) finale(s) particulière(s) Se référer aux indications de l'étiquette et/ou de la fiche technique.

RUBRIQUE 8: CONTRÔLES DE L'EXPOSITION/PROTECTION INDIVIDUELLE

8.1 Valeur limite d'exposition

Composants	No.-CAS	Valeur limite d'exposition	m.à.j.	Base
Bacillus firmus (Souche I1582)		1x10 ⁷ CFU/m ³ (TWA)		OES BCS*
Chlorure d'ammonium (Vapeur.)	12125-02-9	10 mg/m ³ (VME)	01 2008	INRS (FR)
Chlorure d'ammonium	12125-02-9	10 mg/m ³ (TLV)		OES BCS*

*OES BCS : Valeur limite interne Bayer AG, Crop Science Division pour l'exposition professionnelle (Occupational Exposure Standard)

8.2 Contrôles de l'exposition Équipement de protection individuelle

Dans le cadre d'une manipulation normale et de l'emploi préconisé, l'utilisateur final doit se référer aux indications de l'étiquette. Dans les autres cas il est recommandé d'utiliser les protections suivantes.

Protection respiratoire

En cas de manipulation directe et de contact possible avec le produit:
Porter un masque filtrant les particules (facteur de protection 4) de type EN149FFP1 ou équivalent.
Les protections respiratoires ne doivent être utilisées que lors d'expositions de courte durée, après que toutes les mesures de réduction de l'exposition à la source ont été mises en place (par exemple un confinement et/ou une ventilation), de manière à maîtriser les risques résiduels. Veiller à toujours respecter les instructions du fabricant concernant le port et l'entretien des appareils respiratoires.

Protection des mains

Veillez respecter les consignes du fournisseur de gants relatives à la perméabilité et au délai de rupture de la matière constitutive du gant. De plus, prendre en compte les conditions spécifiques de manipulation du produit ainsi que les risques de coupure et d'abrasion et la durée de l'exposition cutanée.

Laver les gants en cas de contamination. Les jeter lorsque la contamination externe ne peut pas être éliminée, lorsqu'ils sont percés ou contaminés à l'intérieur. Se laver les mains fréquemment, et systématiquement avant de manger, boire, fumer ou d'aller aux toilettes.

Type de matière Caoutchouc nitrile

Taux de perméabilité > 480 min

Épaisseur du gant > 0,4 mm

Indice de protection Classe 6

Norme Gants de protection conformes à EN 374.

Protection des yeux

Porter des lunettes masque (conformes à la norme EN166, domaine d'utilisation = 5 ou équivalent).

Protection de la peau et du corps

Porter une combinaison standard et un vêtement de catégorie 3 type 5.

En cas de risques d'exposition significative, un niveau de protection plus important doit être envisagé.

Porter deux couches de vêtements dans la mesure du possible. Une combinaison en coton ou coton/polyester doit être portée sous le vêtement de protection chimique et nettoyée fréquemment par une blanchisserie industrielle.

Si le vêtement de protection est souillé, le décontaminer le mieux possible, puis l'enlever avec précaution. S'en débarrasser en suivant les prescriptions du fabricant.

RUBRIQUE 9: PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

9.1 Informations sur les propriétés physiques et chimiques essentielles Forme poudre

Couleur brun clair

pH 6,0 - 8,0 à 1 % (23 °C) (eau désionisée)

Masse volumique apparente 800 - 960 kg/m³ (non tassé)

9.2 Autres informations Pas d'information supplémentaire disponible liée à la sécurité.

RUBRIQUE 10: STABILITÉ ET RÉACTIVITÉ

10.1 Réactivité

Décomposition thermique Stable dans des conditions normales.

10.2 Stabilité chimique Stable dans les conditions recommandées de stockage.

10.3 Possibilité de réactions Pas de réactions dangereuses si les recommandations de stockage et **dangereuses** de manipulation sont respectées.

10.4 Conditions à éviter Températures extrêmes et lumière du soleil directe.

10.5 Matières incompatibles Stocker dans l'emballage d'origine.

10.6 Produits de Il n'y a pas de produits de décomposition en utilisation normale.
décomposition dangereux

RUBRIQUE 11: INFORMATIONS TOXICOLOGIQUES

11.1 Informations sur les effets toxicologiques Toxicité aiguë par voie orale
DL50 (Rat) > 2.000 mg/kg Toxicité aiguë par inhalation CL50 (Rat) > 5,02 mg/l

Durée d'exposition: 4 h

Produit testé sous forme de fines poussières respirables.

Toxicité cutanée aiguë DL50 (Rat) > 2.000 mg/kg

Corrosion cutanée/irritation cutanée Faiblement irritant - marquage non obligatoire. (Lapin)

Lésions oculaires graves/irritation oculaire Irritation modérée des yeux. (Lapin)

Sensibilisation respiratoire ou cutanée Les micro-organismes peuvent avoir le potentiel de provoquer des réactions de sensibilisation.

Evaluation de la toxicité spécifique pour certains organes cibles (STOT) - exposition unique

Bacillus firmus : Compte tenu des données disponibles, les critères de classification ne sont pas remplis.

Evaluation de la toxicité spécifique pour certains organes cibles (STOT) - exposition répétée

Bacillus firmus : Cette substance n'a pas provoqué de toxicité organo-toxique spécifique lors des expérimentations animales.

Evaluation de la mutagénèse

Bacillus firmus : Non requis pour les micro-organismes.

Evaluation de la cancérogénicité

Bacillus firmus : Non requis pour les micro-organismes.

Evaluation de la toxicité pour la reproduction

Bacillus firmus : Non requis pour les micro-organismes.

Evaluation de la toxicité pour le développement

Bacillus firmus : Non requis pour les micro-organismes.

Danger par aspiration

Compte tenu des données disponibles, les critères de classification ne sont pas remplis.

RUBRIQUE 12: INFORMATIONS ÉCOLOGIQUES

12.1 Toxicité

Toxicité pour les poissons	CL50 (Oncorhynchus mykiss (Truite arc-en-ciel)) > 100 mg/l Durée d'exposition: 96 h La valeur fournie concerne la matière active technique.
Toxicité pour les invertébrés aquatiques	CE50 (Daphnia magna (Puce aquatique)) > 100 mg/l Durée d'exposition: 48 h La valeur fournie concerne la matière active technique.
Toxicité des plantes aquatiques	CI50 (Raphidocelis subcapitata (algue verte d'eau douce)) 24,2 mg/l Taux de croissance; Durée d'exposition: 72 h La valeur fournie concerne la matière active technique.

12.2 Persistance et dégradabilité

Biodégradabilité	Bacillus firmus: Évaluation de la biodégradabilité n'est pas pertinent pour les microorganismes.
-------------------------	---

12.3 Potentiel de bioaccumulation

Bioaccumulation	Bacillus firmus: Évaluation de la bioaccumulation n'est pas pertinent pour les microorganismes.
------------------------	--

12.4 Mobilité dans le sol

Mobilité dans le sol Bacillus firmus: Évaluation de la mobilité dans le sol n'est pas pertinente pour les micro-organismes.

12.5 Résultats des évaluations PBT et vPvB

Évaluation PBT et vPvB Bacillus firmus: Cette substance n'est pas considérée comme persistante, bioaccumulable et toxique (PBT). Cette substance n'est pas considérée comme très persistante et très bioaccumulable (vPvB). **12.6 Autres effets néfastes**

Information écologique *Pas d'autre effet à signaler.*
supplémentaire

RUBRIQUE 13: CONSIDÉRATIONS RELATIVES À L'ÉLIMINATION

13.1 Méthodes de traitement des déchets

Produit	Sous réserve d'observer les règlements en vigueur et, le cas échéant, après accord avec le service de collecte et les autorités compétentes, le produit peut être transporté sur une décharge ou dans une installation d'incinération.
Emballages contaminés	Vider, rincer et éliminer les emballages vides. Les remettre à un service de collecte spécifique aux produits professionnels comme la filière ADIVALOR, ou à un autre service de collecte spécifique comme EcoDDS pour les produits grand public. Les récipients non totalement vidés doivent être éliminés comme des déchets dangereux.
Code d'élimination des déchets	02 01 08* déchets agrochimiques contenant des substances dangereuses

RUBRIQUE 14: INFORMATIONS RELATIVES AU TRANSPORT

Produit non dangereux au sens des réglementations ADN/ADR/RID/IMDG/IATA.

Cette classification n'est en principe pas valable pour le transport par bateau-citerne sur les voies navigables. Veuillez vous adresser au fabricant pour plus d'informations.

14.1 – 14.5 Non applicable

14.6 Précautions particulières à prendre par l'utilisateur

Voir les sections 6 à 8 de cette fiche de données de sécurité.

14.7 Transport en vrac conformément à l'annexe II de la convention Marpol et au recueil IBC Pas de transport en vrac conformément au Recueil IBC.

RUBRIQUE 15: INFORMATIONS RELATIVES À LA RÉGLEMENTATION

15.1 Réglementations/législation particulières à la substance ou au mélange en matière de sécurité, de santé et d'environnement Information supplémentaire

Classement OMS : III (Peu dangereux)

Législation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (Décret n° 2014-285)

Sans nomenclature

15.2 Évaluation de la sécurité chimique

Une évaluation du risque chimique n'est pas exigée.

RUBRIQUE 16: AUTRES INFORMATIONS

Texte des mentions de danger mentionnées dans la Section 3

H302 Nocif en cas d'ingestion.

H319 Provoque une sévère irritation des yeux.

Abréviations et acronymes

ADN	Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieure
ADR	Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route
ETA	Estimation de la Toxicité Aiguë
No.-CAS	Numéro d'enregistrement des Chemical Abstracts Services (CAS)
Conc.	Concentration
No.-CE	Numéro d'enregistrement CE (Communauté Européenne)
CEx	Concentration d'Effet pour X%
EINECS	Inventaire européen des substances chimiques commerciales existantes
ELINCS	Inventaire européen des substances chimiques notifiées
NE/EN	Norme européenne
UE	Union Européenne
IATA	International Air Transport Association : Réglementation IATA (Association Internationale du Transport Aérien) pour le transport aérien des marchandises dangereuses
IBC	International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Dangerous Chemicals in Bulk (IBC Code); Recueil international de règles relatives à la construction et à l'équipement des navires transportant des produits chimiques dangereux en vrac (Recueil IBC)
Cix	Concentration d'Inhibition pour X%
IMDG	International Maritime Dangerous Goods : Code maritime international des marchandises dangereuses
CLx	Concentration Létale pour X%
DLx	Dose Létale pour X%
LOEC/LOEL	Concentration/Dose minimale avec effet observé
MARPOL	MARPOL : International Convention for the prevention of marine pollution from ships - Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires
N.O.S./N.S.A	Not otherwise specified / Non Spécifié par Ailleurs
NOEC/NOEL	Concentration/Dose Sans Effet Observé pour la totalité des organismes exposés. NOEC/NOEL en anglais.
OCDE	Organisation de coopération et de développement économique
RID	Règlement concernant le transport international ferroviaire de marchandises dangereuses
TWA	Valeur limite de moyenne d'exposition
UN	Nations Unies
OMS	Organisation mondiale de la Santé

Les informations données dans la présente fiche de données de sécurité sont conformes aux dispositions des Règlements (CE) no. 1907/2006 et (UE) no. 2015/830 et leurs amendements. Cette fiche complète les notices techniques d'utilisation mais ne les remplace pas. Les renseignements qu'elle contient sont

basés sur l'état de nos connaissances relatives au produit concerné, à la date indiquée. L'attention des utilisateurs est en outre attirée sur les risques éventuellement encourus lorsqu'un produit est utilisé à d'autres usages que ceux pour lesquels il est conçu. Les informations données satisfont aux dispositions réglementaires communautaires en vigueur. Elle ne dispense en aucun cas l'utilisateur de connaître et d'appliquer l'ensemble des textes réglementaires nationaux en vigueur.

Objet de la révision: Section 2 : Identification des dangers. Section 3 :

Composition/Informations sur les composants. Section 8 :
Contrôle de l'exposition / Protection individuelle. Section
11 : Informations toxicologiques. Section 12.
Informations écologiques.

Les modifications par rapport à la dernière version sont mises en évidence en marge. Cette version remplace toutes les éditions précédentes.
--

**ANNEXE 3 : Avis de l'Agence nationale de sécurité
sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et
du travail datant du 12 février 2015**



Le directeur général

Maisons-Alfort, le 12 février 2015

AVIS

de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

**relatif à « la valorisation des insectes dans l'alimentation et l'état des lieux
des connaissances scientifiques sur les risques sanitaires en lien avec la
consommation des insectes »**

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique). Ses avis sont rendus publics.

L'Anses s'est autosaisie le 23 juin 2014 pour la réalisation d'une expertise portant sur la « valorisation des insectes dans l'alimentation et l'état des lieux des connaissances scientifiques sur les risques sanitaires en lien avec la consommation des insectes (2014-SA-0153) ».

1. INTRODUCTION

L'Anses a pour mission de réaliser l'évaluation des risques sanitaires dans son périmètre d'intervention, de fournir aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique et technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion des risques.

Plusieurs organisations internationales se sont récemment prononcées sur la valorisation des insectes pour l'alimentation humaine et animale. Par ailleurs, des opérateurs, notamment français, y voient une opportunité et ont commencé à proposer des produits à base d'insectes. Dans la lignée d'autres agences européennes, notamment belge et néerlandaise qui ont récemment publié leurs rapports sur la sécurité sanitaire des insectes destinés à l'alimentation humaine, l'Agence nationale de sécurité sanitaire a souhaité réaliser un état des lieux des connaissances scientifiques et des bénéfices/risques liés à la consommation des insectes.

Un travail bibliographique mené par l'Université de Liège-Gembloux a permis de faire la revue des connaissances scientifiques existantes.

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail,
14 rue Pierre et Marie Curie, 94701 Maisons-Alfort Cedex
Téléphone : + 33 (0)1 49 77 13 50 - Télécopie : + 33 (0)1 49 77 26 26 - www.anses.fr
ANSES/PR1/9/01-06 [version c]

Le présent avis aborde les questions relatives aux dangers sanitaires (biologiques, physiques, chimiques, allergiques, etc.) chez les insectes et produits à base d'insectes destinés à l'alimentation humaine et animale. Les aspects nutritionnels et environnementaux sont abordés brièvement.

Les éléments suivants n'ont pas été intégrés à la présente expertise :

- La question de l'impact des insectes sur le plan de la sécurité alimentaire ;
- L'évaluation des risques sanitaires par espèce d'insectes ou par produits à base d'insectes ;
- La consommation sous la forme de préparations protéiques (extraits d'insectes) ;
- Les questions relatives au bien-être des insectes aux différents stades de l'élevage et la production ;
- Les problématiques liées à la biosécurité des élevages ;

- Les interactions insectes/plantes et la santé végétale ;
- Les entomopathogènes et la santé des insectes ;
- Les risques sanitaires liés à la collecte dans l'environnement (capture sauvage) des insectes comestibles.

2. cONTEXTE GENERAL

2.1. La FAO se prononce en faveur de la valorisation des insectes

D'ici 2030, plus de neuf milliards de personnes devront être nourries, tout comme les milliards d'animaux élevés chaque année pour l'alimentation, les loisirs ou comme animaux de compagnie (FAO 2009). L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) met ainsi en avant un problème de sécurité alimentaire globale qui risque de se poser, et qui vraisemblablement sera ressenti de manière plus aiguë dans les pays en développement (Belluco, Losasso *et al.* 2013).

Parmi les réponses possibles aux problèmes de suffisance alimentaire pour les hommes et les animaux, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) recommande dans son rapport « *Edible Insects* » d'envisager l'élevage d'insectes à grande échelle (van Huis, van Itterbeeck *et al.* 2013). D'après la FAO, ce sont près de 2,5 milliards d'humains qui mangent régulièrement des insectes dans le monde. Dans de nombreuses parties du monde, avec le changement des habitudes alimentaires et l'urbanisation, ce nombre est en décroissance (Gracer 2010). En Europe, depuis la parution de ce rapport, l'idée de développer une production industrielle d'insectes comestibles fait son chemin (van Huis, van Itterbeeck *et al.* 2013).

Plusieurs publications décrivent les insectes comme ubiquitaires et se reproduisant rapidement (*i.e.* *Acheta domesticus* peut pondre jusqu'à 1500 œufs en un mois), tout au long de l'année dans des conditions contrôlées. Selon ces mêmes publications, les insectes présenteraient, en outre, des taux de croissance et de conversion alimentaire élevés par rapport aux élevages conventionnels d'animaux de rente (Nakagaki et Defoliart 1991). Néanmoins les méthodes de calcul ayant conduit à ces résultats nécessiteraient d'être évaluées. D'autres études mettent en avant un faible impact sur l'environnement pendant tout leur cycle de vie, principalement en raison des plus faibles émissions de gaz

à effet de serre (Oonincx, van Itterbeeck *et al.* 2010) et d'une demande réduite en espace d'élevage. Des publications concluent que certains insectes sont des aliments très nutritifs, particulièrement caloriques avec une teneur élevée en protéines, matières grasses et minérales. Si les insectes étaient élevés industriellement, des travaux entrevoient l'utilisation des déchets organiques, par exemple les déchets alimentaires (utilisation aujourd'hui interdite par la réglementation), comme aliments pour les insectes. Par ailleurs, ces insectes peuvent être consommés entiers, réduits en poudre ou formulés en pâte et incorporés à diverses préparations alimentaires afin d'augmenter l'acceptabilité par les consommateurs (Yi, Lakemond *et al.* 2013).

2.2. Un point de vue soutenu par les industriels

Dans un contexte de raréfaction des ressources, de recul en surface des terres agricoles, et de forte dépendance de l'Europe en protéines pour l'alimentation animale, de nombreux industriels de l'alimentation animale ont montré un intérêt grandissant pour la valorisation des insectes comme source de protéines. Ils considèrent que l'utilisation de matières organiques - de déchets et/ou coproduits de l'agriculture et des industries alimentaires - pour élever des insectes pourrait s'avérer intéressante pour plusieurs raisons : (1) la valorisation de produits de faible valeur (le fumier, les déchets de cuisine ou d'industries agro-alimentaires) en une source de protéines de haute valeur, (2) la réduction d'importants volumes de déchets (tel le vermicompostage c'est-à-dire la transformation en engrais naturels de déchets biodégradables par des vers de compost). Ils entrevoient l'élevage de plusieurs espèces de diptères pour contribuer à la réduction de déchets organiques variés et ce, sur de courtes durées (van Huis 2013).

Selon certains opérateurs, le recours aux insectes, en tant qu'aliment pour l'aquaculture et l'élevage de volailles, devrait se généraliser au cours des prochaines décennies. La production traditionnelle d'aliments pour animaux domestiques devrait encore s'intensifier. Ils considèrent que face à la raréfaction des ressources (terres, eau, etc.) et la nécessité d'une utilisation plus efficace de ces ressources, le temps est venu de se diversifier avec notamment l'utilisation de nouvelles sources de protéines (van Huis 2013).

2.3. Actualités : projets de recherche en cours sur la thématique

Dans ce contexte d'engouement de certaines institutions internationales et des industriels, des projets de recherche français et communautaire ont vu le jour pour améliorer les connaissances scientifiques sur cette thématique.

2.3.1. Projet ANR - DESIRABLE: Conception d'une bioraffinerie d'insectes pour contribuer à des systèmes agroalimentaires plus durables.

Le projet vise à développer une raffinerie de bioconversion par les insectes de coproduits sousvalorisés en protéines adaptées à l'alimentation animale. Il a été lancé en 2013 pour une durée de 48 mois. Plusieurs partenaires publics (cinq laboratoires INRA, CNRS, CEA, ITAP) et privés (Ynsect, IPV Foods) participent à ce projet. L'Anses, aux côtés d'autres institutions publiques, pôles de compétence, organisations de consommateurs et représentants des filières, est membre du comité consultatif de ce projet financé par l'ANR.

Deux espèces d'insectes, le ver de farine, *Tenebrio molitor* et la mouche soldat *Hermetia illucens*, ont été sélectionnées. Les thématiques de recherche portent sur les défis d'une alimentation durable, notamment les aspects sanitaires et nutritifs.

2.3.2. Projet PROTeINSECT - FERA (Food and Environment Research Agency)¹ : "Insects as a sustainable source of protein" ou comment l'exploitation des insectes pourrait apporter une alternative durable à l'approvisionnement en protéines pour l'alimentation animale et la nutrition humaine.

Le projet de trois ans financé par la Commission européenne repose sur un consortium international avec des partenaires publics et privés en Europe, Afrique et Asie.

Deux espèces de mouches, la mouche soldat *Hermetia illucens* et la mouche domestique *Musca domestica*, sont étudiées et leurs larves utilisées en production pour valoriser les déchets organiques en matières fertilisantes. De la biomasse d'insectes pourront être extraits d'autres composés que les protéines destinées à l'alimentation animale, la chitine pour son action antimicrobienne et les lipides pour la production de biodiesels. Parmi les thématiques de l'étude sont abordées les questions relatives à :

- la production industrielle des insectes, la transformation et les essais d'alimentation animale ;
- l'évaluation des aspects qualité et sécurité sanitaire (contaminants environnementaux tels que métaux lourds, dioxines, PCB et PAH ; agents

¹

<http://www.proteins.ect.eu/> ²

Code de l'environnement, [articles L. 413-1 à L. 413-5 \(PDF - 59 Ko\)](#) et [articles R. 413-1 à R. 413-50 \(PDF - 92 Ko\)](#) et ses textes d'application.

pathogènes et d'altération ; résidus chimiques tels les pesticides et les médicaments vétérinaires ; allergènes) ;

- l'analyse du cycle de vie (principalement les aspects environnementaux, parfois économiques et sociétaux).

L'étude est en cours et les résultats sont attendus pour le premier trimestre 2016.

2.4. Contexte réglementaire

L'exploitation des insectes relève de plusieurs textes réglementaires, notamment ceux sur les animaux d'élevage, les sous-produits animaux, les aliments pour animaux et les nouveaux aliments pour l'Homme. Les détails des différentes réglementations sont présentés en annexe 1 du présent avis et sont résumés dans cette partie.

Concernant l'élevage des insectes, il n'existe pas de réglementation spécifique propre à ce type d'élevage. Les insectes étant des espèces non domestiques, ils relèvent de la réglementation "faune sauvage captive"². Ainsi le fait d'exploiter un établissement d'élevage professionnel d'insectes nécessite l'octroi préalable d'un certificat de capacité d'élevage et une autorisation préfectorale d'ouverture. A noter qu'il n'existe aucune mesure nationale de protection animale spécifique aux insectes élevés en captivité.

Par ailleurs, les substrats sur lesquels ils sont élevés ne doivent pas être interdits (Règlement (UE) n°767/2009 2009; Règlement (UE) n°1069/2009 2009).

Les installations et usines susceptibles de générer des risques ou des dangers sont soumises à une législation et une réglementation particulières, relatives à ce que l'on appelle "les installations classées pour la protection de l'environnement". Leurs activités sont énumérées dans une nomenclature qui les soumet à un régime d'autorisation². Plus particulièrement, la rubrique 2150 de cette nomenclature, porte sur les verminières, élevages d'insectes ou de larves d'insectes dans le but de servir d'appâts pour les pêcheurs, ou de nourriture pour des oiseaux de compagnie, des reptiles, etc.

² <http://www.installationsclassées.developpement-durable.gouv.fr/accueil.php>

Concernant l'usage des invertébrés (donc des insectes) non pathogènes pour l'homme en alimentation animale, ils entrent dans la catégorie des matières de catégorie 3 définies à l'article 10.1 du Règlement (UE) n°1069/2009 (2009) mais ne sont pas considérés comme des protéines animales transformées (PAT). Des restrictions d'utilisation sont ainsi réglementairement prévues par le Règlement (UE) n°999/2001 (2001) qui interdit l'utilisation des PAT dans l'alimentation des animaux d'élevage, à l'exception, depuis le 1^{er} juin 2013, des animaux d'aquaculture (Règlement (UE) n°56/2013 2013). Il faut noter que ce règlement ne s'applique pas au *petfood* ni à l'alimentation des animaux à fourrure. Si la législation venait à évoluer en incluant les insectes dans les PAT, leur utilisation serait permise pour les poissons, voire selon les évolutions réglementaires pour les non-ruminants (porcs, volailles).

Le statut réglementaire de l'insecte comme aliment pour l'homme soulève des interrogations. L'usage des insectes en alimentation humaine relève du Règlement (UE) n°258/97 (1997) de la Commission Européenne relatif aux nouveaux aliments et aux nouveaux ingrédients³ et doit donc faire l'objet des autorisations requises par ce texte. Le règlement actuel est imprécis puisqu'il ne vise que les parties d'animaux (et non les insectes entiers) et ambigu (difficulté d'interprétation du « degré significatif » de consommation antérieure à 1997, qui fonde cette réglementation). Une révision du règlement est prévue pour 2016. Les insectes entiers et parties d'insectes devraient y être mentionnés très clairement.

A ce jour, aucun dossier de demande d'autorisation n'a été validé au niveau européen. Par conséquent, aucun insecte, ni dérivé d'insecte, ne peut être mis sur le marché pour l'alimentation humaine en conformité stricte avec la réglementation actuellement en vigueur.

Cependant, face aux intérêts croissants suscités par l'exploitation des insectes, certains industriels en Europe ont fait valoir l'ambiguïté des textes actuels pour s'exonérer des procédures préalables à leur commercialisation. Ainsi, par exemple, l'Agence fédérale pour la sécurité de la chaîne alimentaire (AFSCA) belge a d'ores et déjà autorisé la mise sur le marché de dix espèces d'insectes et de leurs dérivés pour la consommation humaine sur le territoire belge. Sous couvert du respect des règles générales de la législation alimentaire en vigueur, les opérateurs belges bénéficient depuis décembre 2013 d'une "tolérance" en

³ Le statut de « nouvel aliment » est établi sur la base de l'absence d'historique de consommation en Europe avant 1997.

attendant une harmonisation européenne pour l'autorisation de commercialisation sur l'ensemble du marché communautaire.

3. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise - Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

Une convention de recherche et développement (CRD) a été signée entre l'Anses et l'Université de Liège-Gembloux pour la réalisation, par l'Unité d'entomologie fonctionnelle et évolutive de Gembloux Agro Biotech, d'une revue bibliographique des connaissances scientifiques et réglementaires relatives à la consommation d'insectes et de leurs dérivés.

Le produit intermédiaire rendu en janvier 2014 a été relu par un groupe d'experts issus des comités d'experts spécialisés (CES) sur les risques biologiques (BIORISK), chimiques (ERCA) et en alimentation animale (ALAN). Le produit final a été présenté en réunion plénière aux CES BIORISK le 20 mai 2014 et ALAN le 17 juin 2014. Le produit définitif prenant en compte les modifications demandées a été remis par Gembloux Agro Biotech le 7 juillet 2014.

Pour la réalisation du présent avis, l'expertise collective a été réalisée par les CES BIORISK et ALAN sur la base d'un rapport initial, préparé par le groupe d'experts relecteurs du produit de CRD, et présenté lors des sessions plénières de septembre à décembre 2014. Le rapport final a été validé le 10 décembre 2014.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques via le site internet de l'Anses (www.anses.fr)

4. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES

4.1. Généralités

4.1.1. Consommation humaine des insectes dans le monde

a. Consommation intentionnelle

Actuellement, 2086 espèces d'insectes sont consommées par environ 3071 groupes ethniques dans 130 pays du monde (Ramos-Elorduy 2009; Rumpold et Schlüter 2013). Dans les pays de régions tropicales, Afrique, Asie, Australie et Amérique du Sud, l'entomophagie⁴ était traditionnellement développée dans les populations rurales, qui trouvaient dans les insectes récoltés dans la nature une source de protéines abondante et très bon marché (Barre, Caze-Subra et al. 2014). Elle a ensuite gagné les villes fréquemment surpeuplées de ces différents pays, souvent à destination des populations urbaines les plus pauvres. Si la collecte des insectes comestibles perdure encore dans les zones rurales, elle a fait place à une industrie de production en masse d'insectes comestibles, essentiellement localisée dans les zones périurbaines. D'abord développée dans des fermes de taille modeste, cette activité de production et d'élevage d'insectes comestibles s'effectue maintenant dans des entreprises spécialisées, notamment en Thaïlande et dans d'autres pays d'Asie (Barre, Caze-Subra et al. 2014).

Les insectes les plus couramment consommés sont :

- les larves ou adultes d'orthoptères (grillons, criquets et sauterelles) et d'hyménoptères (abeilles, guêpes et fourmis),
- les larves de coléoptères (charançons et longicornes),
- les chenilles et chrysalides de lépidoptères (papillons),
- mais également certains adultes d'isoptères (termites) ou d'hémiptères aquatiques (punaises d'eau) (Durst et Shono 2010; Mignon 2002; Raubenheimer et Rothman 2013).

Il n'existe pas de données précises sur la consommation d'insectes en France, qui est très probablement marginale. Si l'objectif des divers acteurs de la filière est d'intégrer dans le futur les insectes au régime alimentaire de base, aujourd'hui il s'agit encore d'un marché de niche pour quelques consommateurs surtout désireux de sensations nouvelles.

b. Consommation non intentionnelle

Les normes du codex alimentaire relatives aux céréales, légumes secs, légumineuses et matières protéiques végétales interdisent la présence d'insectes

⁴ Entomophagie : du grec ancien « entomos » : insecte et de « phagos » : manger ; désignée comme la consommation d'insectes par l'espèce humaine. Comby B (1990) 'Délicieux insectes. Les protéines du futur.' (Paris)

entiers vivants dans la farine ou dans les graines, mais autorise au maximum 0,1 % de fragments d'insecte par masse d'échantillon. Tenant compte également de cette réalité, la Food and Drug Administration (FDA) a défini des tolérances pour ce type de défauts naturels et inévitables dans certains aliments⁶.

Ainsi, l'entomologiste Marcel Dicke de l'université de Wageningen au Pays-Bas, estime entre 500g et un kilogramme notre consommation involontaire annuelle de fragments d'insectes, notamment dans les produits fabriqués à base de farine (pain, pâtes, biscuits, etc.), chocolat, fruits et jus de fruits et légumes.

4.1.2. Applications industrielles

Certains insectes considérés comme des ravageurs de culture sont néanmoins valorisés à travers le monde (Defoliart 1995). Par exemple, la sériciculture exploite le ver à soie, chenille d'un papillon, le bombyx du mûrier (*Bombyx mori*) qui se nourrit des feuilles de mûrier jusqu'au stade de production de la soie servant à filer son cocon. Le ver à soie a fait l'objet d'une intense domestication en raison de son potentiel technologique et alimentaire. Plusieurs pays dont la Chine se sont investis dans sa production pour l'obtention de la soie et la valorisation des chrysalides en alimentation humaine et animale (Defoliart 1995). Le ministère thaïlandais de la santé publique a autorisé, depuis 1987, l'incorporation des chrysalides de *Bombyx mori* dans la formulation d'aliments prescrits aux enfants souffrant de malnutrition (Defoliart 1995). En Inde, au Japon, au Sri-Lanka et en Chine, les chrysalides de *B. mori* ainsi que les résidus de leur production sont utilisés pour l'alimentation du poisson et de la volaille (Kiuchi et Tamaki 1990). Un autre insecte dont la domestication fut une réussite est l'abeille domestique, *Apis mellifera*. Dans les pays industrialisés l'apiculture est pratiquée pour la production de miel mais aussi de cire d'abeille, de pollen, de propolis, de gelée royale et du venin d'abeille (utilisé pour traiter les allergies graves liées aux piqûres) (Schmidt et Buchmann 1992). Dans les pays tropicaux, les populations consomment en plus du miel, le couvain (larves et pupes) d'abeille.

En industries agroalimentaires et en cosmétique, on utilise le colorant E120 provenant de la cochenille *Dactylopius coccus*. Celle-ci produit de l'acide carminique qui la protège des insectes prédateurs. L'acide carminique est extrait du corps et des œufs de cet insecte pour en faire une teinture colorée rouge, le cramoisi, autorisé comme colorant par la réglementation européenne et utilisé dans diverses formulations alimentaires comme le yaourt, les bonbons ou les sodas (Cardon 2003; Verkerk, Tramper et al. 2007).

<http://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/GuidanceDocumentsRegulatoryInformation/SanitationTransportation/ucm056174.htm>

Certains critères ont été retenus par les professionnels pour une production rentable d'insectes comestibles : le choix porterait sur une espèce intéressante du point de vue nutritif, tout en privilégiant le caractère le plus facilement acceptable par les consommateurs humains (Rumpold et Schlüter 2013b). Leur sélection pourrait aussi être faite sur la base de sa taille, de son comportement social (cannibalisme réduit), de son innocuité pour les manipulateurs, de sa sensibilité aux risques épidémiques, de son potentiel de reproduction et de survie, de ses bénéfices nutritionnels, de son potentiel de stockage et de sa qualité marchande (Schabel 2010). D'une manière générale, ils attendent de l'insecte ciblé qu'il produise beaucoup d'œufs avec des taux de viabilité importants, qu'il se développe rapidement avec une synchronisation maximale des nymphoses afin de faciliter les récoltes d'individus, qu'il possède un haut taux de conversion de la nourriture, que sa nourriture soit peu coûteuse, qu'il soit peu vulnérable aux maladies et capable de vivre dans des volumes réduits avec une forte densité d'individus et qu'il produise des protéines de qualité par rapport aux autres protéines animales ou végétales (Rumpold et Schlüter 2013b).

Les chenilles de lépidoptères sont souvent utilisées car elles sont dépourvues d'ailes à ce stade et ne sautent pas, mais convertissent efficacement la biomasse végétale en biomasse animale (Schabel 2010). Les orthoptères (criquets, sauterelles et grillons) sont également employés en raison de leur abondance et disponibilité géographique (Defoliart 1995). Par exemple, la production d'un kg de biomasse du criquet *Oxya fuscovittata* a été réalisée en 29 à 35 jours à partir de 84 individus (Haldar, Das et al. 1999).

4.1.3. Prise en compte des aspects nutritionnels

Les quelques publications sur le sujet mettent en avant les valeurs nutritionnelles des insectes comestibles, bien que ces travaux ne concernent qu'un nombre très limité d'espèces. Ces résultats sont donc à considérer avec la précaution nécessaire. Il semble que certaines espèces soient particulièrement caloriques, riches en protéines, lipides, minéraux, vitamines et avec des compositions en acides aminés généralement bien équilibrées pour les besoins humains (Raubenheimer et Rothman 2013; Rumpold et Schlüter 2013a). En revanche, les insectes sont décrits comme pauvres en glucides avec un maximum de 10% de la masse totale chez certaines espèces d'insectes (Chen, Feng et al. 2009). La

composition nutritionnelle et le contenu énergétique des principales espèces d'insectes consommées dans divers pays sont présentées dans deux publications récentes (Makkar, Tran *et al.* 2014; Rumpold et Schluter 2013a). Les valeurs fournies sont basées sur la matière sèche. Les insectes considérés sont analysés entiers et contiennent toujours leur exosquelette chitineux.

Une étude comparant 100g d'insectes avec 100g de viande (poids frais) signale un contenu énergétique similaire (à l'exception de certains morceaux de la viande de porc particulièrement riches en matières grasses) (Sirimungkaranat, Saksirirat *et al.* 2008).

Le contenu protéique pourrait être équivalent voire supérieur au contenu protéique de certaines viandes (Bukkens 1997; Ramos-Elorduy 1997; Srivastava, Babu *et al.* 2009). Selon Rumpold et Schluter (2013a), les protéines représentent la principale composante de la matière sèche des insectes, entre 45 et 75g/100g de poids sec, selon les espèces. Selon ces mêmes auteurs, la composition en protéines et le contenu en acides aminés des insectes sont très variables d'une espèce à l'autre. Il apparaît aussi que les insectes sont pauvres en méthionine, ce qui est rarement le cas des viandes. Des essais d'alimentation animale devraient permettre de préciser la qualité des protéines d'insectes, tant du point de vue de la digestibilité que de l'efficacité de conversion du contenu en acides aminés.

Une étude chinoise montre des variations très fortes du contenu lipidique des insectes, entre 7 et 77g/100g de poids sec, en fonction de l'espèce considérée et de leur régime alimentaire (Chen, Feng *et al.* 2009). Le taux lipidique serait plus important dans les larves et les nymphes que dans les insectes adultes (Chen, Feng *et al.* 2009). Les insectes les plus riches en lipides appartiennent généralement aux ordres des isoptères (termites) et des lépidoptères (papillons). Comparés à la volaille et au poisson, les insectes seraient plus riches en acides gras poly-insaturés (AGPI) (DeFoliart 1991). En comparaison, le bœuf et le porc contiennent très peu d'AGPI mais beaucoup plus d'acides gras mono-insaturés (AGMI) (DeFoliart 1991).

La composition en cholestérol varie également avec le régime alimentaire des insectes (Ritter 2010). En effet, ceux-ci sont incapables de produire leurs propres stérols ce qui leur impose d'en obtenir dans leur nourriture.

Les résultats issus de l'étude allemande (Rumpold et Schluter 2013a) montrent que, d'une manière générale, les besoins journaliers pour l'homme en calcium et potassium ne seraient pas satisfaits par la consommation de 100 g d'insectes comestibles. Quant aux faibles quantités de sodium, elles permettraient

d'envisager l'utilisation de certains insectes dans des régimes à faibles teneurs en sel. Enfin, les besoins en cuivre, fer, magnésium, manganèse, sélénium, zinc et phosphore pourraient être assurés avec la consommation de 100 g par jour de certaines espèces d'insectes. La présence de fer et de zinc chez les insectes est particulièrement intéressante car ces deux minéraux sont souvent à l'origine d'insuffisances d'apports dans les pays en développement (Rumpold et Schlüter 2013b; van Huis, van Isterbeeck et al. 2013). La teneur en minéraux varie, elle-aussi, en fonction de l'espèce d'insectes, de son stade de développement et de son régime alimentaire (Rumpold et Schlüter 2013a; Rumpold et Schlüter 2013b; van Huis, van Isterbeeck et al. 2013). Les données relatives aux compositions en vitamines sont peu nombreuses et semblent témoigner d'une très forte variabilité. Cependant certains insectes scrupuleusement sélectionnés semblent pouvoir apporter les vitamines nécessaires à l'homme. De plus, l'élevage de ces insectes sur des substrats riches en vitamines, permettrait d'augmenter la teneur de vitamines dans ces derniers (Pennino, Dierenfeld et al. 1991).

Comme indiqué précédemment, les compositions en nutriments des insectes comestibles sont sujettes d'une façon générale à d'importantes variations. Des facteurs externes comme le climat, la nourriture, l'habitat, la préparation (par exemple insectes grillés ou bouillis) ou encore la méthode d'analyse (Bukkens 1997; Chen, Feng et al. 2009; Verkerk, Tramper et al. 2007) sont aussi à prendre en compte. Afin de pallier ces variations, en cas d'intégration des insectes dans l'alimentation humaine (particulièrement dans celle de personnes atteintes de certains désordres métaboliques), des standards de quantification, des pratiques d'élevages ou encore des compositions de régimes alimentaires doivent être créés et mis à la disposition des éleveurs (Bednářová, Borkovcová et al. 2014).

4.1.4. Prise en compte des questions environnementales

Très peu d'études existent sur l'impact environnemental de l'élevage des insectes. Le développement d'une nouvelle filière d'insectes durable devra prendre en compte l'empreinte environnementale au même titre que les aspects économiques et sociétaux. C'est l'un des objectifs du programme ANR « Désirable » en cours qui étudie les deux espèces *Hermetia illucens* et *Tenebrio molitor*.

Les travaux de Oonincx et de Boer (2012) ont visé à quantifier l'empreinte écologique d'un élevage de *Tenebrio molitor* basé au Pays-Bas, par le biais d'une analyse cycle de vie (ACV). Les ACV ont pour objectif d'évaluer l'impact environnemental d'un système, en analysant tous les processus liés au cycle de production (fabrication et transport des aliments, engrais, énergie, etc.) et sont

régies par les normes ISO 14040 et ISO 14044. Trois paramètres propres aux opérations au sein de l'exploitation ont été analysés et comparés avec les systèmes d'élevages conventionnels d'animaux de rente (de Vries et de Boer 2010) et de production du soja (Dalgaard, Schmidt et al. 2007) pour l'alimentation animale : le « potentiel de réchauffement planétaire » (PRP), l'« utilisation de l'énergie fossile » (UEF), et l'« utilisation au sol » (US). Selon les auteurs, pour deux des trois paramètres étudiés (PRP et US), la production de *Tenebrio molitor* apparaît moins respectueuse de l'environnement que le soja mais plus que les productions animales conventionnelles. Il est à noter que cette analyse ne prend pas en compte la nature qualitative de ces surfaces qui se trouvent valorisées par les animaux de type bovins et seraient peu utilisables pour d'autres types de production. L'UEF calculée serait quasi identique entre les bovins et *T. molitor* alors que le porc et les volailles nécessiteraient une plus faible UEF (le soja n'a pas été classé par manque de données). Cela pourrait s'expliquer par le fait que les insectes sont poïkilothermes (ils ne peuvent donc pas autoréguler leur température corporelle). Ainsi, leur développement dépend des conditions de l'élevage et de leur zone de confort thermique. Dans le cas de *T. molitor*, les conditions optimales tournent autour des 28°C et de 70 % d'humidité relative (Li, Zhao et al. 2013), ce qui implique une grande consommation énergétique pour un élevage en Europe occidentale par exemple. De plus, les insectes présentent un indice de conversion alimentaire (ICA) élevé par rapport aux animaux à sang chaud des élevages conventionnels (van Huis 2010). Par conséquent, l'efficacité de l'élevage, en termes de prise de poids au stade choisi, de durée de la croissance, de consommation en aliments et d'impact environnemental, va nécessiter un contrôle rigoureux de la température d'élevage. Cela pourrait conduire à une consommation énergétique supérieure à celle des élevages conventionnels.

L'impact environnemental en termes de production de gaz à effet de serre devrait aussi être pris en compte. Ce sont de l'ordre de neuf pourcents de CO₂, 35-40% de CH₄, 65% de N₂O et 64% de NH₃ des émissions totales produites par les activités d'origine humaine qui seraient issues des productions animales conventionnelles (Steinfeld 2006). Au niveau mondial, les productions bovines de viande et de lait seraient à l'origine de la majorité des émissions totales produites par les élevages, respectivement 41% et 20%. Alors que les émissions issues des productions porcines et avicoles (chair et œufs) atteindraient respectivement 9% et 8% des émissions totales produites par les élevages (Gerber, Steinfeld et al. 2013). A ce jour il existe une seule étude comparant la production de gaz à effet de serre et d'ammoniaque entre des élevages conventionnels bovins et porcins et cinq espèces différentes d'insectes (Oonincx,

van Itterbeeck *et al.* 2010). Les résultats de l'étude indiquent que les élevages d'insectes produisent généralement moins de gaz à effet de serre. Parmi les insectes, il semble que seuls les blattes, termites et scarabées produisent du méthane (Hackstein et Stumm 1994). Les autres sont dépourvus de bactéries méthanogènes dans le tube digestif. Une sélection adéquate de l'espèce pourrait donc permettre de réduire ces émissions. Selon de Vries et de Boer (2010), les productions de CO₂ et N₂O sont principalement liées au processus de fabrication et de transport des aliments. Si l'on considère que les besoins alimentaires des insectes sont moindres, les gaz produits par ces derniers pourraient l'être en moindres quantités que ceux produits par les élevages porcins et bovins. Cette étude présente cependant deux limites majeures puisque les analyses ont été réalisées sur trois jours et non une durée de vie entière et qu'elle n'inclut que certains stades larvaires et nymphals du développement des insectes.

L'eau est une autre ressource naturelle à prendre en considération dans la mesure de l'impact écologique d'une pratique d'élevage. Selon la FAO, l'agriculture consomme déjà jusqu'à 70% de l'eau extraite des nappes souterraines, des cours d'eau et des lacs (FAO 2011), et pour faire face à la demande alimentaire croissante, cette fraction devrait augmenter de 14% entre la période 2000-2030 (FAO 2004). Selon certains auteurs, la plupart des élevages d'insectes ne requièrent quasiment pas d'apport supplémentaire en eau, en plus de celle contenue dans les aliments (Siemianowska, Kosewska *et al.* 2013; Steinfeld 2006).

4.2. *Elevage des insectes comestibles*

4.2.1. Collecte

Dans de nombreux pays asiatiques, africains et sud-américains, la collecte des insectes sauvages (termites, fourmis, larves, chenilles, criquets) permet de satisfaire aux besoins locaux. C'est une collecte saisonnière qui est immédiatement suivie de la consommation des insectes récoltés. Elle permet à de nombreuses populations d'enrichir un régime alimentaire basé presque exclusivement sur des céréales de faible valeur nutritive (sorgho, millet ou fonio en Afrique) en protéines et lipides. La plupart du temps, ces insectes sont consommés crus ou rapidement grillés. Ce type d'entomophagie par collecte des insectes dans la nature, échappe naturellement à tout contrôle sanitaire.

4.2.2. Systèmes d'élevage des insectes comestibles

a. Introduction

Des élevages industriels d'insectes comestibles se sont essentiellement développés dans les pays asiatiques, la Thaïlande et la Chine en particulier. La FAO a mis à disposition des informations sur les techniques d'élevage de différentes espèces d'insectes⁵. Ces élevages industriels sont souvent des centres collecteurs qui récupèrent la production issue de petites fermes d'élevage pour la conditionner industriellement. La production d'insectes comestibles y constitue une activité industrielle reconnue, qui irrigue un marché intérieur fortement demandeur (consommation humaine essentiellement), et se tourne également de plus en plus vers l'exportation. Ces firmes commercialisent notamment des insectes en vrac ou conditionnés en sachets, et des produits dérivés (farines d'insectes, confiseries à base d'insectes, insectes sucrés, etc.). Ces différents produits sont disponibles auprès de grossistes répartiteurs, installés en Europe, notamment en France.

L'élevage des insectes comestibles s'implante progressivement en Europe, surtout au Pays-Bas où en raison des relations restées fortes que ce pays continue d'entretenir avec les pays asiatiques, plusieurs entreprises spécialisées dans l'élevage des insectes comestibles ont vu le jour. Plusieurs sites industriels destinés à la production d'insectes pour l'alimentation animale ou humaine se développent sur le territoire national. Une fédération française des producteurs, importateurs et distributeurs d'insectes (FFPIDI) a vu le jour en 2011 avec pour objectif de structurer la filière Insectes.

b. Caractéristiques de l'élevage d'insectes comestibles

Les systèmes d'élevage comprennent :

- *Un dispositif de confinement strict* : les insectes destinés à l'alimentation sont élevés dans des cuves ou des bacs, construits à partir de matériaux simples. Ils doivent être étanches au passage des insectes de toute taille, par exemple au moyen de toiles mousseline ou toiles à moustiquaires. A l'échelle domestique ou artisanale en Europe, des terrariums sont utilisés. De nombreuses espèces sont cannibales et dévorent leurs propres œufs et larves si la nourriture vient à manquer. De même, les vers peuvent dévorer les nymphes. Un élevage séparé des adultes et des larves, vers, nymphes est donc fortement conseillé, avec aménagement de zones de nurserie spécifiques pour la ponte et l'élevage des

⁵ <http://www.fao.org/forestry/edibleinsects/fr/>

juvéniles. Par exemple, la durée d'élevage pour des grillons est de deux mois, et seuls les adultes sont collectés et consommés. Inversement les vers de farine sont collectés à l'état de larves «état final » (environ un mois après la ponte), les coléoptères adultes ne sont utilisés que pour la reproduction.

- *Le maintien des conditions strictes d'élevage* : une aération constante, un éclairage naturel ou artificiel est conseillé avec alternance jour/nuit (certaines espèces se nourrissant surtout la nuit). Les lampes d'éclairage permettent également le maintien d'une température suffisante. En effet la température doit être maintenue constante et plutôt élevée (déterminant majeur de la croissance chez ces animaux poikilothermes) : 25 à 30°C par exemple pour les grillons, en atmosphère tempérée. L'hygrométrie doit être contrôlée afin de ne pas favoriser le développement d'acariens et de moisissures qui augmentent la mortalité.
- *Un substrat de culture sec et rigide pour les insectes* : sciure ou copeaux de bois non traités, et/ou dispositifs en pulpe de cellulose, dérivés de papier/carton, terre cuite, etc. Ces substrats doivent présenter des cavités formant des abris (dispositifs à partir de tuiles en terre cuite, empilées, à partir de substrat gaufré en pulpe de cellulose, type « plaques préformées pour le conditionnement des œufs » ou à partir de carton ondulé).
- *Une source d'eau pour l'abreuvement* : sous forme d'eau libre, mise à disposition dans des soucoupes, ou plus facile et indispensable pour certaines espèces, sous forme de buvards humidifiés, ou d'éponges imprégnées d'eau.
- *Un apport de nourriture adapté aux préférences alimentaires et aux capacités de transformation de l'espèce* : une alimentation d'origine végétale, le plus souvent il s'agit de différents végétaux (légumes), produits végétaux (farines) ou déchets de végétaux destinés à l'alimentation humaine (épluchures) sous forme sèche, complétés par une fraction de fruits ou légumes frais coupés très finement. Les céréales floconnées comme les flocons d'avoine par exemple, sont particulièrement faciles à utiliser et constituent un aliment de base adapté. Du pain sec broyé peut également être utilisé facilement. *A priori*, de très

nombreux aliments pourraient servir de nourriture aux insectes, encore qu'il existe chez les insectes et leurs larves, des problèmes d'inappétence et d'acceptabilité de l'alimentation encore mal expliqués (en dehors des laboratoires d'entomologie qui élèvent des insectes et connaissent bien ces problèmes).

Les taux de conversion sont apparemment très favorables mais mériteraient d'être étudiés en fonction des espèces afin de choisir les espèces les plus favorables. Ce taux de conversion apparaît pour les entreprises comme un indicateur crucial pour envisager une production à grande échelle, économiquement rentable, de protéines d'insectes.

Il est à noter qu'une production en masse d'animaux vivants s'accompagne généralement d'exigences zootechniques diverses, notamment sanitaires. De plus, l'existence de microorganismes entomopathogènes est avérée. De fait, l'existence de traitements vétérinaires destinés à l'amélioration générale de l'état de santé des animaux doit être envisagée. Si de tels traitements sont appliqués, il conviendrait d'évaluer le risque présenté par les résidus de médicaments vétérinaires à l'instar de ce qui est réalisé pour d'autres espèces animales.

4.2.3. Abattage des insectes comestibles

Dans les élevages contrôlés, un jeûne des individus de quelques heures à quelques jours peut parfois précéder l'abattage afin d'assurer la vidange du contenu digestif des insectes. Cependant les effets sur la microflore intestinale, selon les espèces, leurs environnements et leurs alimentations n'ont pas été évalués.

Les insectes comestibles collectés au stade de la récolte (larves, juvéniles ou adultes suivant les espèces) sont généralement tués au moyen de deux techniques :

- *par congélation au moins 24h à -18°C* : cette technique dénature peu les protéines et est plus respectueuse de la composition nutritionnelle, mais aucune décontamination microbiologique n'est assurée, et la décontamination parasitaire (notamment la présence de nématodes) n'est pas toujours complète.

- *par ébouillantage* : immersion dans l'eau bouillante de 1 à 5 minutes, ce qui cuit les insectes et assure dans le même temps une décontamination avec une pasteurisation très efficace, suffisante pour détruire les flores végétatives et les parasites, mais pas les spores bactériennes. Une partie des nutriments d'intérêt peut être dégradée. Les insectes ébouillantés sont ensuite égouttés puis séchés. Les insectes cuits ne se conservent pas à ce stade et doivent être transformés immédiatement après ébouillantage, ou refroidis immédiatement jusqu'à 4°C pour un stockage intermédiaire de courte durée. Aucune donnée n'a été trouvée sur la conservation réfrigérée des insectes cuits. Les insectes cuits peuvent toutefois être congelés en attente de transformation.

Il convient de souligner que le développement de telles filières de production d'insectes, depuis l'élevage jusqu'à l'abattage, pose également la question du bien-être animal. Celui-ci a été très peu exploré chez la plupart des invertébrés jusqu'à présent.

4.2.4. Transformation et techniques de conservation pour l'utilisation en alimentation humaine et animale

Il convient de s'assurer que le processus de transformation que vont subir les insectes permet d'assurer leur décontamination. La plupart des insectes comestibles proposés pour l'alimentation animale ou humaine sont déshydratés suite à l'abattage, pour permettre leur conservation. Plusieurs traitements peuvent être mis en œuvre :

- *La déshydratation en four sec ventilé, à basse température* : les températures mentionnées

(Rumpold et Schluter 2013a) s'échelonnent de 60°C à 110°C. Une déshydratation à 90°C en air sec est souvent pratiquée, avec des durées de plus de cinq heures. À cette température, un traitement thermique de pasteurisation est appliqué, avec des valeurs pasteurisatrices très élevées. Une pasteurisation satisfaisante est obtenue, même à partir d'insectes crus décongelés. Dans ce dernier cas, le traitement de déshydratation assure en parallèle une cuisson aux insectes qui n'ont pas été cuits préalablement. Les insectes crus congelés sont préférentiellement décongelés à 4°C avant séchage, avec élimination des exsudats, afin de ne pas introduire de produit à très basse température dans les fours de déshydratation.

- *La friture* (plus rarement employée) : cette technique de traitement thermique à haute température (> 160°) dans l'huile bouillante, s'accompagne d'une décontamination microbiologique plus poussée des produits. La température élevée dénature également les venins de nature protéique. Elle est pratiquée à l'échelle artisanale en Asie, notamment pour la préparation des arachnides (araignées, scorpions), qui sont directement plongées dans la friture. Certains autres insectes comme les criquets sont préparés de cette façon, notamment dans certaines zones d'Afrique. Pendant une opération de friture, la diversité des réactions (thermodégradations de vitamines, pigments, réactions de Maillard, etc.) et transformations génèrent de nouvelles molécules à caractères plus ou moins toxiques, notamment des composés néoformés dont il conviendra d'évaluer le risque sanitaire.
- *Le toasting* : des températures plus élevées de séchage sont parfois pratiquées en fin de cycle (> 120°C) afin de réaliser un « toasting » des insectes, développer des arômes spécifiques ou améliorer la texture (produits volontairement très croustillants pour le « snacking »). Les traitements au-dessus de 100°C, mais en l'absence d'humidité, ne détruisent que très partiellement les spores bactériennes : les produits ainsi traités ne sont que pasteurisés, et une contamination sporulée viable peut demeurer présente.

A noter qu'un séchage insuffisant peut conduire à une conservation médiocre à moyen terme avec le développement de moisissures. Dans la pratique, le séchage mis en œuvre doit amener les insectes à une $a_w < 0,7$ pour une conservation correcte, sans développement de moisissures au cours du stockage et avec inhibition des bactéries présentes.

D'autres méthodes peuvent être envisagées, comme la lyophilisation ou l'acidification (Klunder, Wolkers-Rooijackers *et al.* 2012; van Huis, van Itterbeeck *et al.* 2013).

- *La lyophilisation* : l'opération permet d'éliminer par sublimation la majeure partie de l'eau contenue dans un produit congelé. Il s'agit donc d'une opération de déshydratation à basse température qui autorise une conservation à long

terme des aliments (en lieu frais et sec). La lyophilisation, n'étant pas considérée comme une pratique assainissante, n'est pas adaptée pour des insectes tués par simple congélation, mais pourrait être envisagée pour les insectes préalablement ébouillantés.

- *L'acidification* : Klunder, Wolkers-Rooijackers et al. (2012) ont démontré que la fermentation lactique permettrait d'inactiver les *Enterobacteriaceae* et de stabiliser la population de bactéries sporulantes dans un mélange de farines composites et d'eau contenant entre 10 et 20% de vers de farine (*Tenebrio molitor*) grillés moulus (mélange pour l'enrichissement en protéines de denrées alimentaires fermentés). Le vinaigre aurait aussi été employé avec succès pour conserver des aliments à base d'insectes.

Après déshydratation, les insectes comestibles se conservent à température ambiante comme tout produit sec. Ils doivent être conditionnés après conservation dans un emballage hermétique. Le principal facteur limitant leur conservation est la présence importante d'acides gras insaturés qui engendrent une susceptibilité accrue à la peroxydation due à l'oxygène (rancissement) sous l'effet de la chaleur et de la lumière. La structure et la présentation (solide divisé, petites particules plus ou moins poreuses) favorisent cette oxydation accélérant leur rancissement (saveurs désagréables, perte de qualité nutritionnelle). Un conditionnement sous atmosphère protectrice neutre (azote) ou sous vide est pratiqué pour la maîtrise des durées de vie des produits à base d'insectes. Certains produits déshydratés commercialisés dans l'Union européenne sont conditionnés sous vide puis congelés pour ralentir les réactions d'oxydation.

Les insectes séchés sont commercialisés en UE :

- 1) entiers, en l'état pour le « snacking » ou incorporés dans des préparations de type biscuits,
- 2) comme ingrédients, c'est-à-dire sous forme de farines, après broyage. Cette présentation permet :
 - de faire en sorte que l'insecte n'est plus reconnaissable par le consommateur.

- de broyer et d'incorporer les parties dures chitineuses. Les poudres obtenues peuvent faire l'objet ou non de tamisages / fractionnements, avec des broyages successifs.

Il est à noter que le broyage sans fractionnement n'est généralement pas considéré au sens de la réglementation comme une opération de « transformation » visant à extraire un composant spécifique. Des aliments dits « non transformés » peuvent en effet être simplement broyés. Dans le cas des insectes comestibles, qui ont subi déshydratation et cuisson, ils sont dans tous les cas classés dans la catégorie des aliments transformés, et le broyage final ne change en rien cette classification. Toutefois on peut considérer qu'un tamisage après broyage, pour éliminer certaines fractions et donc concentrer la partie consommée en d'autres fractions, constitue une opération d'extraction de « produits à base d'insectes ». Ce point peut sembler anecdotique mais peut devenir important en ce qui concerne le statut réglementaire des produits alimentaires constitués de tout ou partie d'insectes comestibles, au regard des définitions établies dans la réglementation de la Commission Européenne sur les nouveaux aliments.

La sensibilité à l'oxydation est augmentée par le broyage et les farines obtenues doivent être conditionnées avec soin.

D'une manière générale, il convient de rappeler que, comme pour les autres aliments d'origine animale ou végétale, les insectes comestibles peuvent devenir, suite à une conservation non adaptée, impropres à la consommation humaine.

4.2.5. Applications alimentaires

En général, les insectes utilisés en alimentation humaine sont grillés, frits ou bouillis. Certains modes de consommation traditionnels en usage en Asie, Amérique du Sud ou en Afrique ne sont pas repris ici, car il est peu probable qu'ils soient proposés aux consommateurs européens⁶.

L'incorporation d'insectes et produits d'insectes dans les aliments destinés à l'alimentation animale pourrait être envisagée sans traitement thermique

⁶ Certaines espèces sont préparées dans ces zones géographiques avec des interventions manuelles complexes, comme notamment enlever l'intestin et/ou les rostrés, les élytres dures, ou d'autres parties : antennes, pattes, ailes et autres parties dures ou peu digestibles, de chaque animal, ce qui nécessite évidemment une main d'œuvre qualifiée. Ce type de produits et de préparations ne sont pas proposées en Europe pour le moment.

préalable. Ils doivent alors être consommés rapidement après récolte. S'ils sont transportés pour être commercialisés loin des lieux de production, les conditions doivent préserver leur qualité nutritionnelle et sanitaire.

4.3. Analyse des dangers liés à la consommation des insectes

Les dangers sanitaires associés aux insectes ou produits d'insectes peuvent être de deux grands types :

- spécifiques à l'espèce : présence de dangers microbiens ou d'origine microbienne, de corps étrangers, de substances toxiques (intrinsèques ou bioaccumulés), de substances anti-nutritionnelles ou d'allergènes ;
- liés aux pratiques d'élevage (alimentation, médicaments vétérinaires), de transformation ou encore aux conditions de conservation et de transport.

Les dangers présentés ici peuvent concerner à la fois l'alimentation humaine et animale, et décrivent surtout le manque de connaissance permettant une analyse des dangers exhaustive.

L'analyse des dangers a été faite à date, en fonction de la bibliographie existante et de ce que l'on imagine des modalités raisonnablement prévisibles, aujourd'hui, de la distribution/consommation d'insectes en France.

4.3.1. Les dangers chimiques

a. Les substances toxiques

Les dangers chimiques résultent essentiellement de substances fabriquées par l'insecte lui-même ou de substances accumulées par l'insecte via l'environnement ou l'alimentation. Toutes les espèces d'insectes ne sont donc pas comestibles en l'état, ou seulement à l'état de larves et pas à l'état adulte ou inversement, et peuvent demeurer non-comestibles même en conditions d'élevage et après transformation par cuisson et séchage.

Certaines catégories d'insectes synthétisent des substances toxiques de défense ou répulsives, d'origine endocrine (par exemple de l'acide formique sécrété par les fourmis ou des quinones émises sous forme de jet à 100 °C par les coléoptères bombardiers) ou non glandulaire (par exemple certains papillons appartenant à la superfamille des *Papilionoidea* sont capables de synthétiser *de novo* des composés cyanogéniques toxiques comme la linamarine ou la lotaustaline à partir, respectivement, de valine et d'isoleucine) (Eisner 1970; Zagrobelny, Bak *et al.* 2004). Certaines larves ont par ailleurs développé un

système de défense autonome avec un processus de mélanisation, par lequel elles noircissent et deviennent impropres à la consommation du fait de l'apparition de produits toxiques (exemple de larves de *Galleria mellonella* infectées par une moisissure (Slepneva, Komarov et al. 2003)).

On distingue :

- les insectes dits phanérottoxiques, présentant des dispositifs venimeux externes comme les dards des hyménoptères (incluant les abeilles, les guêpes et les fourmis), les pièces buccales perceuses des hémiptères (comprenant les punaises, les cochenilles, etc.) ou les soies urticantes de certains lépidoptères. L'envenimation par les phanérottoxiques se produit par l'inoculation de venins (hyménoptères) ou par contact avec les produits urticants (la chenille processionnaire du pin) qui provoquent des réactions inflammatoires (Pouvreau 1999). Cependant, l'envenimation peut aussi concerner la voie alimentaire : c'est le cas des larves de *Trogoderma* spp, de l'ordre des coléoptères, capables de provoquer des traumatismes intestinaux par une envenimation attribuée aux soies présentes sur l'insecte. Un cas de colite ulcéreuse a été signalé chez un enfant de 4 mois nourri de céréales infestées de *Trogoderma* (Okumura 1967). Toutefois, pour limiter les risques toxiques d'ingestion de venin, la consommation de larves, dépourvues de dard, sera généralement préférable à celle d'insectes adultes.
- les insectes dits cryptotoxiques, ayant la particularité de stocker et/ou de synthétiser des éléments chimiques toxiques, et dont la toxicité n'apparaît que si l'insecte est consommé. Ils contiennent des substances toxiques qu'ils ont, soit eux-mêmes synthétisées, soit accumulées à partir des végétaux qu'ils consomment. Les insectes phytophages peuvent accumuler des toxines végétales et acquérir ainsi les mêmes propriétés toxiques que les plantes hôtes (Berenbaum 1993). Ils peuvent éventuellement développer en retour des stratégies adaptatives comme la détoxification, l'excrétion ou la bioaccumulation afin d'éviter toute intoxication. Ces phytotoxines sont des métabolites secondaires synthétisées par les plantes vasculaires comme mécanismes de défense active; elles appartiennent à des classes de composés très variées: alcaloïdes, cardénolides, glucosinolates,

cucurbitacines ou encore composés phénoliques, ou cyanogéniques (Bennett et Wallsgrove 1994; Nishida 2002). Les insectes oligophages (se nourrissant d'un nombre limité d'espèces de végétaux) accumulent davantage de phytotoxines que les polyphages. Des variations de l'accumulation sont aussi observées avec le stade de développement de l'insecte et son état physiologique (Bennett et Wallsgrove 1994; Berenbaum 1993). Il convient donc d'alimenter les insectes d'élevage uniquement avec des plantes adaptées à leur métabolisme et en évitant toute production ou bioaccumulation de métabolites secondaires toxiques pour les vertébrés. Un criblage des composants des plantes et des insectes est nécessaire pour détecter la présence de molécules toxiques et leur concentration afin d'évaluer si la plante peut servir de nourriture à l'insecte et si l'insecte peut être considéré comme comestible ou non, que ce soit par l'homme ou par les animaux. Parmi les insectes qui peuvent être élevés, les lépidoptères sont connus pour bioaccumuler très facilement des substances toxiques (Zagrobelny, Bak et al. 2004).

Par ailleurs les insectes peuvent accumuler des substances indésirables présentes dans l'environnement ou l'alimentation, telles que des pesticides, des polluants organiques persistants ou des métaux lourds. Il existe peu de données quantitatives et qualitatives concernant l'accumulation de pesticides. Seule une étude de Saeed, Abu Dagga et al. (1993) démontre que les criquets sont des bioaccumulateurs "efficaces" d'insecticides. Dans les élevages il faut donc contrôler strictement la teneur en pesticides de la nourriture proposée aux insectes car leur accumulation est susceptible de présenter des risques pour l'alimentation humaine et animale dans la mesure où ces molécules ne sont généralement pas éliminées par les traitements thermiques. Il en est de même pour les polluants organiques persistants. Par exemple, Gaylor, Harvey et al. (2012) ont démontré la capacité des grillons domestiques à bioaccumuler des polybromodiphényléthers présents dans des mousses de polyuréthane. Enfin plusieurs études ont mis en évidence la présence d'éléments-traces métalliques dans des insectes : cadmium dans les larves de *Tenebrio molitor* (Vijver, Jager et al. 2003), plomb dans des grillons grillés au Mexique (Handley, Hall et al. 2007), arsenic chez un lépidoptère consommé par les aborigènes en Australie (Green, Broome et al. 2001). Plus récemment, Zhuang, Zou et al. (2009) ont montré une légère bioaccumulation d'éléments traces métalliques (plomb, zinc, cuivre et cadmium) entre les différents niveaux trophiques de la chaîne

alimentaire sol-plante-insecte-poulet, bien que ces éléments aient été relativement efficacement éliminés dans les excréments des insectes.

A l'instar des élevages conventionnels existants, l'usage de médicaments vétérinaires est à prévoir dans les élevages d'insectes pour réduire la mortalité associée notamment à des infections bactériennes ou parasitaires. La bibliographie fait très peu état de la présence de résidus de médicaments vétérinaires dans les tissus d'insectes. Une étude portant sur une maladie du ver à soie (*Bombyx mori*), fait référence à l'usage du chloramphénicol, antibiotique à large spectre, dont l'usage est interdit en production animale (Règlement (UE) n° 37/2010 2010). Cappellozza, Saviane *et al.* (2011) ont montré que cet antibiotique, administré par voie alimentaire, n'était pas inactivé dans l'appareil digestif du ver à soie.

Les méthodes, procédés et matériels utilisés dans la chaîne de production des aliments peuvent être à l'origine d'un transfert de contaminants à partir des matériaux au contact des denrées alimentaires (MCDA), de la production de substances néoformées à partir de molécules contenues dans la matière première incluant les additifs ou les auxiliaires technologiques suite à divers traitements. Le grignotage de supports plastiques doit être évité, en particulier chez les larves, et les pratiques d'élevage doivent être contrôlées par des bonnes pratiques d'hygiène et une analyse des dangers lors de la production primaire pour éviter les teneurs en actifs chimiques ou les contaminations exogènes au-delà des seuils réglementaires. Les conditions de conservation et de transport ainsi que les pratiques de consommation (crus, cuits, grillés etc.) peuvent aussi être à l'origine de risques sanitaires liés aux substances toxiques (produits de la réaction de Maillard, produits néoformés).

b. Les facteurs antinutritionnels

La présence de substances anti-nutritionnelles a également déjà été démontrée chez certaines espèces d'insectes. Ce problème revêt une importance toute particulière chez les personnes dont l'alimentation est carencée en vitamines ou tout autre nutriment important (Belluco, Losasso *et al.*

2013). Les principaux facteurs antinutritionnels identifiés chez les insectes sont :

- l'acide phytique qui diminue la biodisponibilité du phosphore en le complexant en phytate,

- les oxalates qui, absorbés en grande quantité, provoquent des irritations du tractus digestif, des troubles de la circulation sanguine et des dommages rénaux,
- l'acide cyanhydrique, hautement toxique car provoquant l'anoxie,
- les tannins, toxiques à forte dose en faisant précipiter les protéines,
- la thiaminase qui provoque une déficience en vitamine B1, et fut la cause, pendant plus de 40 ans, d'un important syndrome ataxique saisonnier au Nigéria (Nishimune, Watanabe *et al.* 2000).

La composition en mg/100g de poids sec des quatre premières substances pour quelques espèces d'insectes (ou ordres pour les espèces non déterminées) sont communiquée dans l'annexe 2.

Les animaux sont sensibles à ces facteurs antinutritionnels. Avant toute utilisation alimentaire d'insectes, il conviendra donc d'identifier si ces substances sont présentes ainsi que leur concentration. Il faudra éventuellement trouver des solutions pour éliminer ces substances, par chauffage ou extrusion par exemple, lorsqu'elles y sont sensibles.

De plus la chitine qui est un constituant de l'exosquelette des insectes et l'un de ses dérivés, le chitosan, peuvent être considérés comme des facteurs antinutritionnels. En effet outre le fait que la chitine est peu ou pas digérée par les animaux dont l'appareil digestif est souvent dépourvu de chitinase (ce qui provoque des phénomènes de constipation pouvant aller jusqu'à l'occlusion intestinale), cette molécule ainsi que le chitosan peuvent se lier à des lipides et former des gels qui emprisonnent certaines vitamines et minéraux, diminuant ainsi leur biodisponibilité. Ce fort pouvoir de liaison aux lipides (environ 15 fois le poids du chitosan), est aujourd'hui étudié dans les recherches portant sur l'obésité.

4.3.2. Les dangers physiques

Les insectes comestibles sont généralement consommés entiers, ou après préparation pour en enlever certaines parties dures dont la consommation n'est pas souhaitée (élytres, rostrés, ailes, etc.). Les insectes comestibles ne sont pas particulièrement vecteurs de dangers physiques au sens classique (contaminants denses ou corps étrangers). Lors de leur transformation, ils sont sujets à des recontaminations par des corps étrangers venant des procédés, comme tous autres aliments transformés.

Les insectes déshydratés consommés entiers comportent des parties dures susceptibles de présenter un danger particulier. De même, les insectes présentant un dard ou un rostre pointu peuvent présenter un danger spécifique. Ces dangers liés à la présence de corps étrangers doivent être pris en compte. Les consommateurs devraient être informés de la présence de ces parties dures comme étant naturellement présentes dans le produit. Ainsi l'AFSCA indique dans son avis⁷ qu' « *il est donc fortement conseillé d'indiquer le cas échéant sur l'étiquette du produit que les pattes et les ailes de l'insecte doivent être retirées avant consommation* ». Les produits d'insectes présentés broyés et sous forme de farines ne sont pas vecteurs de corps étrangers spécifiques, autres que ceux apportés par les procédés.

4.3.3. Le danger allergène

Le risque d'allergies alimentaires est un des plus prévisibles en raison de l'existence d'allergènes communs (pan-allergènes) aux arthropodes, arachnides (acariens, araignées, scorpions), crustacés (homards, crevettes, crabes) et insectes. De même, les allergènes des mollusques et des helminthes sont souvent très proches de ceux des insectes et peuvent donner lieu à des réactions et/ou des allergies croisées (Barre, Caze-Subra et al. 2014).

Les phénomènes d'allergies alimentaires sont peu documentés chez les animaux de rente mais la possibilité d'allergies croisées ne peut pas être exclue car les farines d'arthropodes sont des ingrédients potentiels des régimes alimentaires; elles servent par exemple de compléments protéiques et d'appétants dans les aliments pour les poissons d'élevage.

a. Réactions allergiques chez l'homme rapportées dans la littérature

Plusieurs cas d'allergie ont été rapportés chez les personnels de laboratoire affectés à l'entretien des élevages d'insectes. Il s'agit essentiellement de troubles respiratoires (toux, rhinites, dyspnée, bronchite, asthme) mais également de manifestations cutanées (démangeaisons, prurit). Ces réactions allergiques sont attribuées à des aéro-allergènes et à des allergènes de contact. D'autres allergies professionnelles ont été identifiées chez des fermiers, des

⁷ Avis du Conseil supérieur de la santé et du Comité scientifique de l'Agence fédérale de sécurité de la chaîne alimentaire (AFSCA) pour répondre à la question « la consommation d'insectes présente-elle ou non des risques pour la santé ? » http://www.health.belgium.be/eportal/Aboutus/relatedinstitutions/SuperiorHealthCouncil/19099435_FR

agriculteurs et des boulangers dues, dans ce dernier cas, à des insectes contaminant la farine.

Plusieurs cas d'allergie alimentaire dus à l'ingestion d'insectes ont été rapportés dans la littérature. Les insectes incriminés étaient le ver de farine (*Tenebrio molitor*), le ver de farine géant (*Zophobas morio*), le ver à soie (*Bombyx mori*), le ver de palmier (*Rhynchophorus ferrugineus*), le ver mopane (*Gonimbrasia belina*). Le « pancake syndrome » correspond à une anaphylaxie alimentaire résultant de l'ingestion accidentelle d'acariens contaminant les farines de céréales (SanchezBorges, Suarez-Chacon et al. 2005).

Un cas de choc anaphylactique chez un touriste français dû à la consommation de pupes de ver à soie (*Bombyx mori*) a été rapporté par Ji, Zhan et al. (2008). Ces auteurs mentionnent différentes publications (en chinois), qui font référence à 13 réactions anaphylactiques suite à l'ingestion de pupes de ver à soie frites dans l'huile. Ils estiment qu'en Chine, chaque année, plus d'un millier de réactions anaphylactiques sont enregistrées après consommation de ces pupes rôties. Ces chiffres laissent présager que les réactions anaphylactiques aux insectes comestibles sont plus fréquentes que ne l'indiquent les très rares publications consacrées à ce sujet. Plusieurs cas de réaction croisée entre le champignon chenille utilisé en médecine traditionnelle chinoise (*Ophiocordyceps sinensis*), et les pupes de ver à soie (*Bombyx mori*), ont même été rapportés par Choi, Shin et al. (2010). L'allergène responsable n'a pas été identifié.

En 2012, un cas d'allergie alimentaire sévère (avec hospitalisation) au ver de palmier (larves de *Rhynchophorus ferrugineus*) a été signalé en Malaisie chez un touriste chinois ayant consommé une vingtaine de larves rôties (Yew et Kok 2012).

b. Les allergènes des insectes comestibles

Globalement, les allergènes des insectes restent mal connus, même si certains des quelques insectes responsables de réactions allergiques sévères ont été bien étudiés et caractérisés. C'est le cas des allergènes des cafards ou blattes et des allergènes des venins d'hyménoptères (abeilles, guêpes, frelons). Les allergènes des insectes comestibles n'ont fait l'objet que d'un nombre très limité de travaux (ver à soie, (Barre, Caze-Subra et al. 2014)). Quant aux antigènes contenus dans les venins d'insectes phanérottoxiques, le risque associé pour les animaux ou les hommes pourrait être écarté en choisissant des espèces

ou des stades de développement (larves dans le cas des hyménoptères) dépourvues de dards (Belluco, Losasso *et al.* 2013).

La plupart des allergènes d'insectes correspondent à des protéines ubiquitaires ou pan-allergènes, susceptibles de donner lieu à des réactions croisées. C'est le cas des protéines musculaires (actine, myosine, tropomyosine, troponine C), des protéines cellulaires (tubulines), de protéines circulantes (hémocyanines, défensines) et de nombreuses protéines à propriétés enzymatiques (α -amylase, arginine-kinase, glutathion S-transférase, triosephosphate isomérase, trypsine).

La chitine, constituant fondamental de l'exosquelette des arthropodes (cuticule des acariens et des insectes, carapace des crustacés), de différents organes des mollusques (radula des gastéropodes, bec des pieuvres), des parois cellulaires des moisissures et du tégument des helminthes, est également considérée comme un allergène mais ses effets sur le système immunitaire sont complexes. Chez les insectes, elle agit sur l'immunité innée mais ses effets sont différents en fonction de la taille des chaînes de N-acétylglucosamine (chitosanes) qui la constituent. Elle peut avoir des effets immuno-stimulants ou au contraire, diminuer la réponse allergique (Lee, Simpson *et al.* 2008; Muzzarelli 2010). Un avis de l'EFSA indique l'absence de risque pour l'homme, dans les conditions d'utilisation préconisées (entre 2 et 5g/jour), d'un complément alimentaire constitué de 90% de chitine-glucane (EFSA 2010). La richesse en chitine des insectes comestibles peut toutefois poser un problème de digestibilité car les chitinases identifiées dans les sécrétions gastriques ne paraissent pas suffisamment actives pour hydrolyser ce polymère.

Les particularités de la fucosylation des N-glycanes chez les insectes, créent de nouvelles spécificités immuno-chimiques ou glycotopes, pouvant être reconnues au même titre que les épitopes protéiques, par les sujets allergiques. C'est la raison pour laquelle, l'utilisation des protéines recombinantes thérapeutiques exprimées par des baculovirus, peut être déconseillée. Ce sont ces groupes Fuc α 1-3GlcNAc, qui créent de nouveaux glycotopes que les sujets allergiques peuvent reconnaître.

c. Les réactions et/ou allergies croisées

Les relations phylogénétiques plus ou moins étroites existant entre les différents phylums d'arthropodes, expliquent parfaitement ces homologies de séquences et de structure, elles-mêmes responsables de l'existence d'épitopes B communs dans certains allergènes (pan-allergènes), à l'origine d'une

réactivité/allergie croisée éventuelle entre les insectes comestibles et d'autres arthropodes, acariens (arachnides), crustacés et insectes non comestibles (blattes).

Des exemples de pan-allergènes impliqués dans des réactions croisées entre les insectes et les crustacés ont été rapportés. Ces quelques exemples donnent corps à une possibilité de réactivité et/ou allergie croisée entre les insectes comestibles et d'autres arthropodes comme les acariens, les blattes, les crevettes, les mollusques et même les nématodes. La consommation d'insectes par des individus allergiques aux acariens ou aux crevettes, pourrait très bien déclencher des réactions allergiques imputables à cette réactivité croisée.

Dans une étude récente (Verhoeckx, van Broekhoven *et al.* 2013), l'existence d'une réactivité croisée entre les acariens (la tropomyosine « Der p 10 » de *Dermatophagoides pteronyssinus*) et le ver de farine (*Tenebrio molitor*) a été démontrée. Elle repose sur des pan-allergènes, la tropomyosine mais aussi sur d'autres allergènes comme l'arginine kinase, la triose-phosphate isomérase et les tubulines. Les deux premières ont été identifiées comme les principales protéines responsables de la réaction croisée. La tropomyosine appartient à une famille de protéines fortement conservées, possédant de multiples isoformes (dues à des variations de quelques acides aminés) et retrouvées aussi bien dans des cellules musculaires que non-musculaires de toutes les espèces du règne animal (Leung, Wing Kuen *et al.* (1996); Reese, Ayuso *et al.* (1999) citées dans Belluco, Losasso *et al.* (2013)). La tropomyosine est un allergène thermostable, de 32 à 39 kDa, constitué de deux hélices alpha enroulées l'une autour de l'autre, donnant à la protéine une structure hélicoïdale (Metz-Favre, Rame *et al.* 2009). L'arginine kinase, quant à elle, est une enzyme souvent présente chez les invertébrés et une réaction allergique croisée est déjà connue entre différents crustacés, acariens, *Plodia interpunctella* (lépidoptères - Pyralidae), *Bombyx mori*, *Blattella germanica* (blattoptères - Blattidae) et *Periplaneta americana* (blattoptères - Blattidae) (Liu, Xia *et al.* 2009; Verhoeckx, van Broekhoven *et al.* 2013).

La possibilité de réactions croisées entre les insectes comestibles et les autres groupes d'arthropodes (acariens, crustacés), les mollusques et les nématodes, mériterait d'être étudiée à plus grande échelle.

L'existence d'une réactivité croisée n'implique pas automatiquement l'existence d'allergies croisées entre les insectes comestibles et les autres arthropodes, les mollusques et les helminthes. Beaucoup de réactions croisées n'ont aucune signification clinique mais elles doivent inciter à la prudence en matière d'entomophagie. Il est à prévoir que la consommation d'insectes par des sujets allergiques à d'autres arthropodes, des crustacés en particulier, puisse déclencher des réactions croisées (allergies croisées?) liées à des pan-allergènes. Dans cette éventualité, il est prudent de recommander à ces sujets de ne pas consommer d'insectes comestibles ou des produits en renfermant.

En France, sous réserve qu'il existe un risque allergique réel lié à des réactions et/ou allergies croisées, ce risque ne serait pas *a priori* négligeable, comme le suggère une simple estimation: - on estime que l'allergie alimentaire touche 3,5% de la population française, soit un Français sur 30 (2.300.000/65.500.000), tous âges confondus.

- on estime que l'allergie aux crustacés et aux mollusques touche 2% des enfants et 3% des adultes souffrant d'allergies alimentaires, soit 5% de ces Français (115.000), tous âges confondus, soit un Français sur 20 souffrant d'allergies alimentaires (115.000/2.300.000) ou un Français sur 550 (0,1%) si on se réfère à la population totale (115.000/65.500.000). - environ 100.000 personnes, soit la population d'une ville française moyenne, pourraient donc être potentiellement concernées par ces réactions et/ou allergies croisées.

En fait, ce chiffre est très approximatif et doit être nettement inférieur, car la plupart des réactions croisées observées dans l'allergie alimentaire ne se traduisent par aucun symptôme clinique. Mais le danger, à ce jour, ne peut être exclu, bien qu'il ne puisse être estimé en l'absence d'étude à grande échelle.

4.3.4. Les dangers microbiologiques

D'une manière générale, comparativement à d'autres denrées alimentaires d'origine animale, il existe un fort déficit d'informations sur les dangers microbiologiques.

a. Les dangers parasitaires

Les risques parasitaires liés aux insectes sont assez peu documentés et les quelques études publiées concernent principalement les risques chez l'homme.

Les insectes, notamment ceux envisagés pour la production de masse, peuvent être porteurs de parasites et ce danger doit être considéré sérieusement. Ainsi des parasites ont été mis en évidence dans des échantillons d'insectes dans le cadre d'une étude sur les parasitoses intestinales en Asie du Sud-Est (Chai, Shin *et al.* 2009). Les mammifères, oiseaux et poissons peuvent constituer des hôtes réservoirs. Plusieurs types de parasitoses en relation avec la consommation d'insectes ont été décrits:

- Les parasitoses à cercaires et métacercaires, via des insectes aquatiques ou vivants aux abords de l'eau, dont certaines espèces d'oiseaux et de poissons peuvent être des réservoirs hôtes (Chai, Shin *et al.* 2009).
- Des parasitoses dues à des nématodes, notamment *Gongylomena pulchrum*, un genre de nématode de la superfamille des *Spiruroidea*, dont des coléoptères et des blattoptères sont les hôtes intermédiaires. Des cas de zoonoses consécutifs à la consommation de tels insectes crus ont été rapportés (Wilson, Lorente *et al.* 2001) et ne peuvent pas être exclus chez les animaux de rente.
- La maladie de Chagas, une maladie parasitaire qui sévit dans les régions rurales d'Amérique du Sud et centrale, provoquée par *Trypanosoma cruzi* qui est transmis par des réduves (punaises hématophages de la sous-famille des *Triatominae*) par piqûres mais aussi via les déjections. Les oiseaux semblent être immunisés contre ce parasite mais de nombreux mammifères peuvent constituer des réservoirs hôtes (Pereira, Schmidt *et al.* 2010).
- Des myiases intestinales causées par des larves de Diptères dont notamment *Hermetia illucens*, la mouche soldat, qui fait l'objet d'élevage à destination de l'alimentation animale (Sehgal, Bhatti *et al.* 2002).
- Des toxoplasmoses dues à des blattes et certains diptères (Graczyk, Knight *et al.* 2005).

La consommation d'insectes crus semble avoir pu être mise en relation avec certaines maladies parasitaires chez les consommateurs. Une meilleure connaissance des relations parasites/insectes conduirait à l'identification de bonnes pratiques d'élevage, voire des traitements ciblés en cours de production. L'adoption de stratégies de vermifugation, ainsi que de bonnes pratiques de gestion des animaux et des bacs d'élevage sont nécessaires pour réduire le risque de contamination et de réinfection par les parasites. Certains modes de production comprennent une lyophilisation (sans traitement thermique). Il conviendrait d'évaluer l'efficacité de ce type de traitement sur les parasites, de

même que l'efficacité de la congélation d'insectes. Ce risque est très probablement moins aigu pour les insectes traités thermiquement, même si, d'une manière générale, la réévaluation de certains barèmes, au regard de cette matrice, s'avérerait judicieuse.

b. Les dangers viraux

Il n'existe pas de documentation sur les risques viraux associés à la manipulation ou l'ingestion d'insectes.

c. Les dangers bactériens et leurs toxines

Les bactéries pathogènes d'insectes (entomopathogènes) sont considérées comme inoffensives pour les animaux et l'homme du fait de l'éloignement phylogénétique des hôtes (van Huis 2013). Les risques bactériens liés aux insectes seront de ce fait principalement dus au portage (naturel ou accidentel) de dangers bactériens (et leurs toxines) avérés pour l'homme et l'animal, aux conditions d'élevage (substrats et alimentation), de manipulation, de transformation et de conservation. Des exemples d'altérations microbiennes (défaut de conservation) d'insectes préparés montrent qu'ils peuvent constituer un milieu compatible avec la survie/croissance des bactéries. Peu d'informations sont disponibles sur la compatibilité de ce milieu avec la toxino-génèse. Seuls quelques cas de botulisme en Afrique ont été rapportés après la consommation d'insectes (Schabel 2010).

Les agents bactériens susceptibles d'être transmis par la consommation d'insectes semblent :

- soit être liés à la flore intrinsèque des insectes (tube digestif et autres compartiments anatomiques),
- soit avoir une origine extrinsèque liée à l'environnement et aux conditions d'élevage.

Des bacilles tels que ceux provoquant l'anthrax (*B. anthracis*) ou des intoxications alimentaires (*B. cereus*) peuvent être transmis par des insectes eux-mêmes contaminés à partir de sol servant de substrat d'élevage. Des spores de microorganismes peuvent se trouver sur la cuticule des insectes et être ainsi consommés par les animaux ou l'homme (van Huis 2013).

Quelques rares publications font mention de l'absence de résultats positifs suite à la recherche de quelques pathogènes « majeurs » (*Salmonella*, *L. monocytogenes*, *E. coli* et *C. perfringens*) pour différentes catégories d'insectes transformés (cuits le plus souvent) (Alabi, Fievez et al. A soumettre; Giaccone 2005). D'autres travaux ont permis l'isolement de bactéries pathogènes (*Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* et *B. cereus*) de *Oryctes monocerus*, qui est un coléoptère couramment consommé en Afrique de l'Ouest (Banjo, Lawal et al. 2006).

Cependant, des analyses entreprises sur plusieurs insectes qui pourraient être élevés (le ver de farine géant *Zophobas morio*, le ver de farine *Tenebrio molitor*, la fausse teigne *Galleria melonella*, et le criquet domestique *Acheta domesticus*) n'ont pas révélé la présence de *Salmonella* ou de *L.*

monocytogenes (Giaccone 2005; van Huis, van Itterbeeck et al. 2013).

Les flores bactériennes retrouvées dans les différents insectes comestibles analysés sont des contaminants alimentaires classiques et connus avec des risques différents sur la santé animale et humaine en fonction des espèces et sans doute du mode de production des insectes.

d. Les dangers fongiques

Des flores fongiques notamment des espèces produisant des mycotoxines ont été isolées d'échantillons d'insectes dans plusieurs études. Les isolats les plus fréquents sont *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Cladosporium*, et *Phycomycetes* (Simpanya, Allotey et al. 2000) et proviendraient d'une part d'une contamination initiale par les feuilles et le sol et d'autre part, d'une recontamination liée aux mauvaises conditions de séchage et de stockage. Des mycotoxines peuvent être produites par des souches d'*Aspergillus*, de *Penicillium*, et de *Fusarium*, même si peu de travaux en font état. En 1996, des chercheurs ont trouvé dans des échantillons de chenilles d'*Imbrasia belina* (largement consommées dans le sud de l'Afrique) des niveaux d'aflatoxines variant de 0 à 50 µg par kg de produit (Mpuchane, Taligoola et al. 1996). Ceci peut poser problème lorsque la consommation de ces chenilles est régulière.

e. Les dangers liés aux agents transmissibles non conventionnels (ATNC)

La possibilité que des ectoparasites puissent servir de réservoir ou de vecteur aux prions a été suggérée dans plusieurs publications (Lupi 2006; Wisniewski, Sigurdarson et al. 1996). La transmission horizontale de la tremblante des petits ruminants au sein de troupeaux infectés est reconnue et les insectes pourraient

jouer un rôle actif dans la contamination. Des bio-essais ont été réalisés en laboratoire à partir de pupes d'insectes (*Sarcophaga carnaria*), ayant ingéré des éléments de système nerveux central infectieux. Des hamsters nourris expérimentalement avec ces insectes ont par la suite développé la tremblante. Des mouches adultes auraient aussi la capacité d'exprimer des protéines prions (Lupi 2003; Post, Riesner *et al.* 1999). Le risque lié aux ATNC ne peut donc être exclu.

f. Efficacité des traitements physiques de transformation/préservation des insectes sur les agents microbiologiques

Plusieurs traitements physiques sont envisagés ou appliqués pour rendre comestible, transformer et/ou préserver les insectes en vue de leur consommation. Il s'agit souvent de traitements thermiques « classiques ». Il n'y a pas, pour l'instant, d'informations publiées sur l'effet assainissant de traitements physiques alternatifs (hautes pressions, lumière pulsée, etc.). Pour mémoire, l'utilisation des rayonnements ionisants à faible dose est autorisée pour la désinsectisation des fruits et graines dans le cadre de la lutte contre les insectes ravageurs⁸. L'influence de la matrice alimentaire sur la thermorésistance est bien connue et décrite pour un grand nombre de matrices alimentaires usuelles en Europe (effet protecteur de l'aliment, synergie pH acide-température, etc.). Cela a conduit souvent à développer des traitements thermiques de référence adaptés à la matrice. Il semble important que nos références soient réinterrogées au regard de la matrice inusuelle que constituent les insectes. La très grande diversité d'espèces d'insectes qui peuvent être consommés, ajoutée à la diversité des stades auxquels ils peuvent être consommés ainsi que les différents modes de préparation/consommation renforcent la nécessité de telles vérifications. Les rares études disponibles qui se sont attachées à évaluer l'effet de traitements thermiques chez les insectes sur la flore bactérienne totale, les levures et moisissures ou les flores spécifiques, vont également dans ce sens. Pour van Huis *et al.* (2013), un moyen d'éliminer les contaminants éventuels des insectes est de les cuire (les bouillir ou les rôtir) ou de les pasteuriser. Néanmoins, les comptages réalisés font encore apparaître des nombres relativement élevés d'ufc/g (10^6 - 10^7 /g en flore totale) pour des produits cuits (ébulliantés). On imagine facilement que la flore totale initiale de ces insectes entiers devait être encore plus élevée. Ces résultats, qui méritent d'être consolidés, peuvent être néanmoins très utiles pour qualifier ou

⁸ Les rayonnements ionisants sont appliqués à des doses non suffisantes pour éliminer les bactéries, et ne visent qu'à assurer la stérilisation des insectes ravageurs.

piloter un processus de transformation ou pour fixer une valeur pasteurisatrice (VP) de référence. Des études sur l'impact de plusieurs méthodes de production, de conservation et de transformation sur la diversité et l'abondance de micro-organismes présents en fonction des insectes candidats pour le marché européen seront également nécessaires.

4.4. Conclusions du CES

Les insectes vivants et transformés peuvent être considérés comme des réservoirs et/ou des vecteurs potentiels d'agents biologiques (et de leurs toxines), chimiques et physiques susceptibles d'affecter la santé de l'homme et de l'animal lors d'une consommation directe ou indirecte via l'alimentation des animaux de rente.

Les dangers peuvent intervenir soit par nature (insecte = réservoir primaire du danger biologique (tube digestif et autres pièces anatomiques)), soit à l'occasion d'une contamination lors des processus de production, transformation, préparation (élevage sur un support contaminé, alimentation contaminée, traitement assainissant insuffisant, défaut de conservation, transfert de contamination, etc.).

Les qualités sanitaires de l'insecte considéré en tant qu'aliment doivent être du même niveau que les autres aliments. À ce jour, les différentes phases (élevage, préparation, conditionnement, conservation) de la production d'insectes comestibles ont été étudiées sur un nombre restreint d'espèces et des études complémentaires ciblées sont nécessaires.

L'ensemble des procédés mis en œuvre pour assurer la sécurité sanitaire des aliments devra garantir l'atteinte des objectifs fixés par la réglementation sur l'hygiène des aliments. Un contrôle de ces conditions de production devrait également être proposé, comme pour les produits d'origine animale, portant sur la nature et l'origine des aliments donnés aux insectes, la maîtrise des risques et la garantie de la biosécurité des installations. Ce contrôle de l'élevage, de la préparation et du conditionnement des insectes comestibles s'appliquerait aux insectes entiers et aux produits dérivés, farines d'insectes en particulier, susceptibles de participer à l'élaboration de différents produits alimentaires.

Compte tenu du métabolisme très particulier des insectes, l'élevage, la préparation et la commercialisation d'insectes pour l'alimentation devraient être entourés de précautions spécifiques, et en particulier faire l'objet de recherches analytiques des éventuelles substances toxiques dans les produits finis, au cas par cas, comme le requiert l'autorisation préalable de mise sur le marché des nouveaux aliments (Règlement (UE) n°258/97 1997).

Le présent travail a permis de mettre en évidence le fort déficit d'informations scientifiques de nature à faciliter une bonne évaluation des risques.

Le comité souhaite faire part des réflexions suivantes :

- L'utilisation d'insectes sauvages collectés dans le milieu naturel devrait être écartée, au profit des insectes d'élevage présentant une garantie de traçabilité, et pouvant bénéficier d'une démarche HACCP complète.
- Seules certaines espèces peuvent faire l'objet de consommation. Il conviendrait d'établir préférentiellement (i) une liste positive d'espèces déjà correctement évaluées, pour en faciliter la consommation, liste qui ne doit pas être définitive et (ii) une liste « négative » d'espèces déjà évaluées, présentant des dangers identifiés, et interdites pour la consommation humaine, liste qui peut ne pas être définitive si des traitements d'assainissement appropriés peuvent être mis en œuvre. Les espèces identifiées comme susceptibles de contenir des venins ou des substances toxiques, au stade de leur récolte, devraient faire l'objet d'analyses spécifiques permettant de s'assurer de leur innocuité après transformation.
- Le développement de l'élevage des insectes devrait s'accompagner de l'élaboration de recommandations sur les bonnes pratiques (élevage, transport et abattage).
- Le jeûne des insectes avant abattage et ses effets sur la microflore digestive et son impact en termes de risques sanitaires doivent être évalués.
- Pour éviter la bioaccumulation de produits toxiques chez les insectes, l'alimentation devrait être strictement contrôlée ainsi que la qualité des substrats d'élevage (substrats organiques notamment). Une réglementation spécifique devrait notamment être envisagée vis-à-vis des substances indésirables et des limites maximales de résidus (LMR) pour les produits phytopharmaceutiques, les médicaments vétérinaires et les intrants de cultures, du fait des phénomènes spécifiques de métabolismes et de bioaccumulation de substances toxiques.
- L'analyse complète des dangers, pour les insectes utilisés en alimentation, devrait être menée, telle que préconisée dans le règlement sur les nouveaux

aliments (Règlement (UE) n°258/97 1997). Des analyses microbiologiques plus détaillées, ciblées sur des pathogènes majeurs (et leurs toxines) et quelques indicateurs bien choisis, complétées éventuellement par des analyses génomiques pour identifier l'ensemble des microorganismes dominants présents chez les insectes, et les dangers biologiques associés, devraient être entreprises sur un nombre limité d'insectes candidats à une éventuelle production en masse.

- Les pathogènes majeurs potentiellement présents dans les produits finis devraient faire l'objet d'analyses. Notamment, il serait nécessaire de mieux connaître la relation matrice-insecte/toxinogénèse pour *S. aureus*, *B. cereus* et *C. botulinum*. Une meilleure connaissance des parasitoses associées à la consommation d'insectes serait nécessaire. Il en est de même pour les prions pour lesquels le risque ne peut être exclu. En outre, il faudrait étudier le danger viral qui n'a pas fait l'objet d'études à ce jour.
- Les risques chimiques principaux de la production d'insectes à des fins alimentaires résulteraient de substances fabriquées en quantité suffisante par certaines espèces, au-delà des seuils de réactivité et/ou de protection sanitaire pour l'homme, ou de substances accumulées lors du métabolisme de l'insecte à partir de son environnement dans le cadre d'une grande variabilité d'interactions dynamiques faisant intervenir de nombreux facteurs d'espèces et écosystémiques. Une sélection des espèces non toxiques devrait être suivie d'études toxicologiques comme celles menées par une équipe chinoise sur des protéines de pupes de ver à soie (Zhou et Han 2006). Les procédés de transformation peuvent aussi être à l'origine de l'apparition de substances néoformées dont le risque lié à leur présence doit être évalué.
- Les parties physiques (ailes, pattes, rostrés, etc.) naturellement présentes dans les produits d'insectes doivent être prises en compte dans l'analyse des dangers.
- L'existence de nombreuses protéines communes aux insectes comestibles, aux autres arthropodes (acariens, crustacés), aux mollusques, aux moisissures et aux helminthes, pourrait conduire à des réactions croisées avec les IgE de sujets allergiques aux crustacés et aux acariens en particulier. Cela démontre l'utilité d'analyser expérimentalement le risque allergique potentiel afin de

caractériser les allergènes majeurs spécifiques de quelques espèces d'insectes, de préciser la résistance à la dénaturation thermique et digestive de ces allergènes majeurs, d'étudier l'évolution de ces allergènes majeurs au cours d'une conservation prolongée des insectes comestibles, de vérifier l'existence de réactions croisées. Par ailleurs, bien que la question sorte du champ d'application du présent avis, le comité tient à souligner que l'exposition aux allergènes des différents acteurs de la filière doit faire l'objet de mesures de prévention du risque allergique en milieu professionnel.

- D'une manière générale, l'insecte, en tant que matrice alimentaire non usuelle, devrait être étudié afin de mieux qualifier et au besoin adapter les pratiques assainissantes associées à des procédés de cuisson, de séchage, de réfrigération, de congélation, de traitement thermique, etc. Une qualité microbiologique satisfaisante des insectes préparés, requiert un traitement thermique équivalent au moins à une pasteurisation, obtenue par cuisson et/ou séchage.
- Les techniques de conservation devraient être adaptées pour assurer la maîtrise des durées de vie des insectes et produits à base d'insectes. Les insectes déshydratés devraient être amenés à une humidité résiduelle compatible avec leur conservation et conditionnés dans un emballage étanche, voire sous atmosphère modifiée, adapté pour la date de durabilité annoncée, en tenant compte de la richesse en acides gras insaturés qui rend ces produits très sensibles à l'oxydation.
- Pour la consommation humaine, en l'absence de garantie sur la sécurité microbiologique des aliments à base d'insectes, il est préférable de ne pas les consommer crus. La qualité microbiologique de ces aliments à base d'insectes est également à prendre en compte pour l'alimentation animale.
- Un étiquetage adéquat devrait avertir le consommateur de la présence, sous toutes ses formes, d'insectes dans les aliments. Plus particulièrement, les consommateurs devraient être informés de la possible présence de parties dures d'insectes (ailes, pattes, rostrés, etc.), naturellement présentes dans le produit.
- Une communication claire serait indispensable sur les utilisations détournées/ fautives raisonnablement prévisibles des insectes et produits à base d'insectes

: par exemple, la vente d'insectes ou produits d'insectes destinés à l'alimentation animale et réorientés en alimentation humaine.

5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail adopte les conclusions du CES « Biorisk ».

L'entomophagie est une pratique très répandue dans certaines parties du monde (Afrique, Asie, Amérique latine) où elle peut faire partie de la culture alimentaire traditionnelle. La FAO estime que « Les insectes complètent les régimes alimentaires d'environ deux milliards de personnes » dans le monde et s'est prononcée en faveur du développement de l'élevage d'insectes à grand échelle pour répondre aux inquiétudes croissantes sur la sécurité alimentaire et l'approvisionnement en protéines. En Europe, cette pratique semble bénéficier d'un engouement croissant et plusieurs projets industriels et programmes de recherche accompagnent ce secteur naissant, et ce malgré une réglementation en vigueur (actuellement en pleine évolution) qui soulève de nombreuses interrogations.

Un tel contexte a conduit l'Anses à mener un état des lieux des connaissances scientifiques sur le sujet, en insistant particulièrement sur la documentation des risques sanitaires éventuels liés à la consommation des insectes et produits d'insectes, à la fois en alimentation animale et humaine.

Ce travail a mis en évidence le manque de données scientifiques disponibles sur des sujets périphériques à cette étude comme l'impact environnemental de la production d'insectes comparé à d'autres sources de protéines (notamment sur les sujets de l'empreinte écologique et du coût énergétique) et l'intérêt nutritionnel des différentes espèces d'insectes et produits d'insectes. Ce constat est également valable en ce qui concerne les thématiques au cœur de ce travail comme les dangers spécifiques liés aux insectes et à la sécurité sanitaire dans les pays consommateurs, qui à ce jour semble plus attestée par un historique de consommation que par des études scientifiques d'évaluation des risques

La présente étude a ainsi mis en exergue le besoin de recherches dans le but de permettre une évaluation complète des risques sanitaires liés à la consommation des insectes. En effet, comme tous les aliments, les insectes peuvent véhiculer certains dangers qui doivent être maîtrisés par la fixation de normes spécifiques afin de réduire les risques potentiels liés à la consommation de ces produits.

Ces dangers sont principalement liés à :

- des substances endogènes et spécifiques à certaines catégories d'insectes possédant des venins ou des facteurs antinutritionnels.
- aux conditions d'élevage et de production pour lesquelles il conviendrait de définir un encadrement spécifique permettant de garantir la maîtrise des risques sanitaires ;
- des sensibilités spécifiques à certains consommateurs, compte tenu de la présence dans les insectes de pan-allergènes communs à l'ensemble des arthropodes (acariens, crustacés, mollusques, etc.).

L'Anses recommande ainsi :

- d'accentuer l'effort de recherche sur ces thématiques ;
- d'établir au niveau communautaire des listes positives et négatives, des différentes espèces et stades de développement d'insectes pouvant ou non être consommés ;
- d'explorer au plan scientifique la question du bien-être animal pour ces catégories d'invertébrés;
- de définir un encadrement spécifique des conditions d'élevage et de production des insectes et de leurs produits permettant de garantir la maîtrise des risques sanitaires ;
- de fixer des mesures de prévention du risque allergique à la fois pour les consommateurs et en milieu professionnel.

En attendant, la mise en place de ces normes spécifiques et d'un encadrement adapté, l'Anses appelle les consommateurs à la prudence notamment s'ils présentent un terrain favorable aux allergies alimentaires.

Au-delà des enjeux d'expertise spécifiquement associés aux questions d'évaluation des risques sanitaires et des bénéfices nutritionnels relatifs à la consommation des insectes, l'Anses souligne les forts enjeux de connaissances portant sur l'acceptabilité sociétale de ces nouvelles consommations ou encore sur les enjeux de développement et d'impact environnementaux qui y sont associés.

Marc Mortureux

*

Insectes, entomophagie, alimentation, risques sanitaires, allergie.

BIBLIOGRAPHIE

Adeduntan (2005) Nutritional and antinutritional characteristics of some insects foraging in Akure forest reserve Ondo State, Nigeria. *Journal of Food Technology* **3(4)**, p. 563-567.

Adesina AJ (2012) Proximate and anti-nutritional composition of two common edible insects: yam beetle (*Heteroligus meles*) and palm weevil (*Rhynchophorus phoenicis*). *Elixir Food Science* **48**.

Alabi T, Fievez T, Jonas M, Blecker C, Danthine S, Caparros R, Haubruge E, Francis F (A soumettre) Effect of sanitation treatment on the microbiological quality and nutritional value of edible insects.

Banjo AD, Lawal OA, Adeyemi AI (2006) The Microbial Fauna Associated with the Larvae of *Oryctes monocerus* *Journal of Applied Sciences Research* **2(11)**, 837-843.

Barre A, Caze-Subra S, Gironde C, Bienvenu F, Bienvenu J, Rougé P (2014) Entomophagie et risque allergique. *Revue Française d'Allergologie* **In press**.

Bednářová M, Borkovcová M, Komprda T (2014) Purine derivate content and amino acid profile in larval stages of three edible insects. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **94(1)**, 71-76.

Belluco S, Losasso C, Maggioletti M, Alonzi CC, Paoletti MG, Ricci A (2013) Edible insects in a food safety and nutritional perspective: A critical review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* **12(3)**, 296-313.

Bennett RN, Wallsgrave RM (1994) Transley Review No.72. Secondary metabolites in plant defence mechanisms. *New Phytologist* **127(4)**, 617-633.

Berenbaum MR (1993) Sequestered Plant Toxins and Insect Palatability. *The Food Insect Newsletter* **6(3)**, 1-12.

Bukkens SGF (1997) The nutritional value of edible insects. *Ecology of Food Nutrition* **36**(2-4), 287-319.

Cappellozza S, Saviane A, Tettamanti G, Squadrin M, Vendramin E, Paolucci P, Franzetti E, Squartini A (2011) Identification of *Enterococcus mundtii* as a pathogenic agent involved in the "flacherie" disease in *Bombyx mori* L. larvae reared on artificial diet. *J Invertebr Pathol* **106**(3), 386-93. [In eng]

Cardon D (2003) 'Le Monde des teintures naturelles.' (Belin: Paris) 586

Chai JY, Shin EH, Lee SH, Rim HJ (2009) Foodborne intestinal flukes in Southeast Asia. *Korean Journal of Parasitology* **47**(SUPPL.), S69-S102.

Chen X, Feng Y, Chen Z (2009) Common edible insects and their utilization in China: INVITED REVIEW. *Entomological Research* **39**(5), 299-303.

Choi GS, Shin YS, Kim JE, Ye YM, Park HS (2010) Five cases of food allergy to vegetable worm (*Cordyceps sinensis*) showing cross-reactivity with silkworm pupae. *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology* **65**(9), 1196-1197.

COM (2007) 872 (2007) Proposition de règlement COM(2007) 872 final du Parlement Européen et du Conseil, 2007. Les nouveaux aliments. *Journal officiel des Communautés européennes*.

Comby B (1990) 'Délicieux insectes. Les protéines du futur.' (Paris)

Dalgaard R, Schmidt J, Halberg N, Christensen P, Thrane M, Pengue WA (2007) LCA of soybean meal. *The International Journal of Life Cycle Assessment* **13**(3), 240-254.

de Vries M, de Boer IJM (2010) Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science* **128**(1-3), 1-11.

DeFoliart GR (1991) Insect fatty acids: similar to those of poultry and fish in their degree of unsaturation, but higher in the polyunsaturates. *The Food Insect Newsletter* 4(1), 1-8.

Defoliart GR (1995) Edible insects as minilivestock. *Biodiversity and Conservation* 4(3), 306-321.

Directive 2002/32/CE (2002) Directive 2002/32/CE du Parlement européen et du Conseil, du 7 mai 2002, sur les substances indésirables dans les aliments pour animaux.

Durst P, Shono K (2010) Edible forest insects: exploring new horizons and traditional practice. In 'Edible Forest Insect: Human Bite Back. Proceedings of a workshop on AsiaPacific resources and their potential for development.' (Eds Durst PB, Johnson DV, Leslie RN and S K): Bangkok, Thailand)

EFSA (2010) EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific Opinion on the safety of 'Chitin-glucan' as a Novel Food ingredient. *EFSA Journal* 2010; Available online: www.efsa.europa.eu/efsajournal. 17 pp.

Eisner T (1970) Chemical Defense against Predation in Arthropods. In 'Chemical Ecology.' (Eds E Sondheimer and JB Simeone). (Academic Press Inc.: New York)

Ekop EA, Udoh AI, Akpan PE (2010) Proximate and anti-nutrient composition of four edible insects in Akwa Ibom State, Nigeria. *World Journal of Applied Science and Technology* 2, p. 224-231.

FAO (2004) L'eau, l'agriculture et l'alimentation. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.*

FAO (2009) How to feed the world in 2050 (http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf).

FAO (2011) 'Rapport de synthèse: l'état des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde.' (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.)

Gaylor MO, Harvey E, Hale RC (2012) House crickets can accumulate polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) directly from polyurethane foam common in consumer products. *Chemosphere* **86**(5), 500-505.

Gerber PJ, Steinfeld H, Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman J, Falcucci A, Tempio G (2013) Tackling climate change through livestock - A global assessment of emissions and mitigation opportunities. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.*

Giaccone V (2005) Hygiene and health features of "minilivestock". In 'Ecological implications of minilivestock. Potential of rodents, frogs, snails, and insects.' Ed. MG Paoletti) pp. 579-598. (Science Publishers: New Hampshire)

Gracer D (2010) Filling the plates: serving insects to the public in the United States. Eds: Durst, P. B.; Johnson, D. V.; Leslie, R. N.; Shono, K.: Forest insects as food: humans bite back. Proceedings of a workshop on Asia-Pacific resources and their potential for development, Chiang Mai, Thailand, 19-21 February, 2008, 2010, pp 217-220, 1 ref. .

Graczyk TK, Knight R, Tamang L (2005) Mechanical transmission of human protozoan parasites by insects. *Clinical Microbiology Reviews* **18**(1), 128-132.

Green K, Broome L, Heinze D, Johnston S (2001) Long Distance Transport of Arsenic by Migrating Bogong Moths from Agricultural Lowlands to Mountain Ecosystems. *The Victorian Naturalist* **118**(4), 112-116.

Hackstein JH, Stumm CK (1994) Methane production in terrestrial arthropods. *Proc Natl Acad Sci U S A* **91**(12), 5441-5. [In eng]

Haldar P, Das A, Gupta RK (1999) A laboratory based study on farming of an Indian grasshopper *Oxya fuscovittata* Marschall Orthoptera: Acrididae. *Journal of Orthoptera Research* **8**, 93-97.

Handley MA, Hall C, Sanford E, Diaz E, Gonzalez-Mendez E, Drace K, Wilson R, Villalobos M, Croughan M (2007) Globalization, binational communities, and imported food risks: results of an outbreak investigation of lead poisoning in Monterey County, California. *Am J Public Health* **97**(5), 900-6. [In eng]

Ji KM, Zhan ZK, Chen JJ, Liu ZG (2008) Anaphylactic shock caused by silkworm pupa consumption in China. *Allergy* **63**(10), 1407-1408.

Kiuchi M, Tamaki Y (1990) Future of edible insects. *Farming Japan* **24**, 37-41.

Klunder HC, Wolkers-Rooijackers J, Korpela JM, Nout MJR (2012) Microbiological aspects of processing and storage of edible insects. *Food Control* **26**(2), 628-631.

Lee KP, Simpson SJ, Wilson K (2008) Dietary protein-quality influences melanization and immune function in an insect. *Functional Ecology* **22**(6), 1052-1061.

Leung PSC, Wing Kuen C, Duffey S, Hoi Shan K, Gershwin ME, Ka Hou C (1996) IgE reactivity against a cross-reactivity allergen in crustacea and mollusca: Evidence for tropomyosin as the common allergen. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* **98**(5), 954-961.

Li L, Zhao Z, Liu H (2013) Feasibility of feeding yellow mealworm (*Tenebrio molitor* L.) in bioregenerative life support systems as a source of animal protein for humans. *Acta Astronautica* **92**(1), 103-109.

Liu Z, Xia L, Wu Y, Xia Q, Chen J, Roux KH (2009) Identification and characterization of an arginine kinase as a major allergen from silkworm (*Bombyx mori*) larvae. *Int Arch Allergy Immunol* **150**(1), 8-14. [In eng]

Lupi O (2003) Could ectoparasites act as vectors for prion diseases? *Int J Dermatol* **42**(6), 425-9. [In eng]

Lupi O (2006) Myiasis as a risk factor for prion diseases in humans. *J Eur Acad Dermatol Venereol* **20**(9), 1037-45. [In eng]

Makkar HPS, Tran G, Heuzé V, Ankers P (2014) State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology* **197**(0), 1-33.

Metz-Favre C, Rame JM, Pauli G, de Blay F (2009) Tropomyosin: Pan-allergen. *La tropomyosine : un pan-allergène* **49**(5), 420-426.

Mignon J (2002) L'entomophagie : une question de culture ? *Tropicultura* **20**(3), 15-155.

Mpuchane S, Taligoola H, Gashe B (1996) Fungi associated with *Imbrasia belina*, an edible caterpillar. *Botswana Notes and Records* **28**, 193-197.

Muzzarelli R (2010) Chitins and Chitosans as Immunoadjuvants and Non-Allergenic Drug Carriers. *Marine Drugs* **8**(2), 292-312.

Nakagaki BJ, Defoliart GR (1991) Comparison of Diets for Mass-Rearing *Acheta domesticus* (Orthoptera: Gryllidae) as a Novelty Food, and Comparison of Food Conversion Efficiency with Values Reported for Livestock. *Journal of Economic Entomology* **84**(3), 891-896.

Nishida R (2002) Sequestration of defensive substances from plants by Lepidoptera. In. Vol. 47'. pp. 57-92)

Nishimune T, Watanabe Y, Okazaki H, Akai H (2000) Thiamin is decomposed due to *Anophe* spp. entomophagy in seasonal ataxia patients in Nigeria. *Journal of Nutrition* **130**(6), 1625-1628.

Okumura GT (1967) A report of canthariasis and allergy caused by *Trogoderma*. *Californian Vector Views* **14**(3), 19-22.

Omotoso OT (2006) Nutritional quality, functional properties and anti-nutrient compositions of the larva of *Cirina forda* (Westwood) (Lepidoptera: Saturniidae). *Journal of Zhejiang University Science* **7**(1), p. 51-55.

Oonincx, van Itterbeeck, Heetkamp, van den Brand, van Loon, van Huis (2010) An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption. *PLoS ONE* **5**(12).

Oonincx DGAB, de Boer IJM (2012) Environmental Impact of the Production of Mealworms as a Protein Source for Humans - A Life Cycle Assessment. *PLoS ONE* **7**(12), e51145.

Pennino M, Dierenfeld ES, Behler JL (1991) Retinol, α -tocopherol and proximate nutrient composition of invertebrates used as feed. *International Zoo Yearbook* **30**(1), 143-149.

Pereira KS, Schmidt FL, Barbosa RL, Guaraldo AM, Franco RM, Dias VL, Passos LA (2010) Transmission of chagas disease (American trypanosomiasis) by food. *Adv Food Nutr Res* **59**, 63-85. [In eng]

Post K, Riesner D, Walldorf V, Mehlhorn H (1999) Fly larvae and pupae as vectors for scrapie. *Lancet* **354**(9194), 1969-70. [In eng]

Pouvreau A (1999) Les insectes venimeux urticants. *INSECTES* **114**(5), 9-12.

Ramos-Elorduy J (1997) Insects: A sustainable source of food? *Ecology of Food Nutrition* **36**(2-4), 247-276.

Ramos-Elorduy J (2009) Anthro-entomophagy: Cultures, evolution and sustainability. *Entomological Research* **39**(5), 271-288.

Raubenheimer D, Rothman JM (2013) Nutritional ecology of entomophagy in humans and other primates. In. Vol. 58'. pp. 141-160)

Reese G, Ayuso R, Lehrer SB (1999) Tropomyosin: An invertebrate pan-allergen. *International Archives of Allergy and Immunology* **119**(4), 247-258.

Règlement (UE) n°56/2013 (2013) Règlement (UE) n° 56/2013 fixant les règles pour la prévention, le contrôle et l'éradication de certaines encéphalopathies spongiformes transmissibles.

Règlement (UE) n°68/2013 (2013) Règlement (UE) n° 68/2013 de la Commission du 16 janvier 2013 relatif au catalogue des matières premières pour aliments des animaux (1).

Règlement (UE) n°183/2005 (2005) Règlement (UE) n° 183/2005 du Parlement Européen et du Conseil du 12 janvier 2005 établissant des exigences en matière d'hygiène des aliments pour animaux. *Journal officiel des Communautés européennes* **31**.

Règlement (UE) n°258/97 (1997) Règlement (UE) n° 258/97 du Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 1997 relatif aux nouveaux aliments et aux nouveaux ingrédients alimentaires.

Règlement (UE) n°767/2009 (2009) Règlement (UE) n° 767/2009 du Parlement européen et du Conseil du 13 juillet 2009 concernant la mise sur le marché et l'utilisation des aliments pour animaux, modifiant le règlement (CE) n° 1831/2003 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant la directive 79/373/CEE du Conseil, la directive 80/511/CEE de la Commission, les directives 82/471/CEE, 83/228/CEE, 93/74/CEE, 93/113/CE et 96/25/CE du Conseil, ainsi que la décision 2004/217/CE de la Commission.

Règlement (UE) n°852/2004 (2004) Règlement (UE) n° 852/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 relatif à l'hygiène des denrées alimentaires

Règlement (UE) n°854/2004 (2004) Règlement (UE) n° 854/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 fixant les règles spécifiques d'organisation des contrôles officiels concernant les produits d'origine animale destinés à la consommation humaine.

Règlement (UE) n°999/2001 (2001) Règlement (UE) n°999/2001 du Parlement européen et du Conseil du 22 mai 2001 fixant les règles pour la prévention, le contrôle et l'éradication de certaines encéphalopathies spongiformes transmissibles.

Règlement (UE) n°1069/2009 (2009) Règlement (UE) n° 1069/2009 du Parlement Européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine et abrogeant le règlement (CE) no 1774/2002 *Journal officiel des Communautés européennes* **31**.

Règlement (UE) n° 37/2010 (2010) Règlement (UE) n° 37/2010 du 22 décembre 2009 relatif aux substances pharmacologiquement actives et à leur classification en ce qui concerne les limites maximales de résidus dans les aliments d'origine animale.

Ritter (2010) Insect and Cholesterol. *Food insects Newsl.* **3**(1), 1-6.

Rumpold BA, Schlüter OK (2013a) Nutritional composition and safety aspects of edible insects. *Mol Nutr Food Res* **57**(5), 802-23. [In eng]

Rumpold BA, Schlüter OK (2013) Nutritional composition and safety aspects of edible insects. *Molecular Nutrition and Food Research* **57**(5), 802-823.

Rumpold BA, Schlüter OK (2013b) Potential and challenges of insects as an innovative source for food and feed production. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* **17**, 1-11.

Saeed T, Abu Dagga F, Saraf M (1993) Analysis of residual pesticides present in edible locusts captured in Kuwait. *Arab Gulf Journal of Scientific Research* **11**(1), 1-5.

Sanchez-Borges M, Suarez-Chacon R, Capriles-Hulett A, Caballero-Fonseca F (2005) An update on oral anaphylaxis from mite ingestion. *Ann Allergy Asthma Immunol* **94**(2), 216-

20; quiz 220-2, 306. [In eng]

Schabel HG (2010) Forest insects as food: a global review. In 'Edible Forest Insect: Human Bite Back. Proceedings of a workshop on Asia-Pacific resources and their potential for development.' (Eds Durst PB, Johnson DV, Leslie RN and S K): Bangkok, Thailand)

Schmidt JO, Buchmann SL (1992) 'Other products of the hive. In The hive and the honey bee.' (Dadant and Sons: Hamilton, Illinois)

Sehgal R, Bhatti HP, Bhasin DK, Sood AK, Nada R, Malla N, Singh K (2002) Intestinal myiasis due to *Musca domestica*: a report of two cases. *Jpn J Infect Dis* **55**(6), 191-3. [In eng]

Siemianowska E, Kosewska A, Aljewicz M, Skibniewska KA, Polak-Juszczak L, Jarocki A, Jędras M (2013) Larvae of mealworm (*Tenebrio molitor* L.) as European novel food. *Agricultural Sciences* **04**(06), 287-291.

Simpanya MF, Allotey J, Mpuchane SF (2000) A mycological investigation of phane, an edible caterpillar of an emperor moth, *Imbrasia belina*. *J Food Prot* **63**(1), 137-40. [In eng]

Sirimungkararat S, Saksirirat W, Nopparat T, Natongkham A (2008) Edible products from eri silkworm (*Samia ricini* D.) and mulberry silkworm (*Bombyx mori* L.) in Thailand. *Proceedings of a Workshop on Asia-Pacific Resources and Their Potential for Development. RAP Publication 2010/02* **19-21**, 189-200.

Slepneva IA, Komarov DA, Glupov VV, Serebrov VV, Khrantsov VV (2003) Influence of fungal infection on the DOPA-semiquinone and DOPA-quinone production in haemolymph of *Galleriamellonella* larvae. *Biochem Biophys Res Commun* **300**(1), 188-91. [In eng]

Srivastava SK, Babu N, Pandey H (2009) Traditional insect bioprospecting - As human food and medicine. *Indian Journal of Traditional Knowledge* **8**(4), 485-494.

Steinfeld H (2006) 'Livestock's long shadow: environmental issues and options.' (FAO: Rome)

van Huis A (2010) Opinion: Bugs can solve food crisis. *The scientist - Magazine of the Life Sciences* (Vol.).

van Huis A (2013) Potential of insects as food and feed in assuring food security. **58**, 563583.

van Huis A, van Itterbeeck J, Klunder HC, Mertens E, Halloran A, Muir G, Vantomme P (2013) Edible insects: future prospects for food and feed security. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.

Verhoeckx K, van Broekhoven S, Gaspari M, de Hartog-Jager S, de Jong G, Wichers H, van Hoffen E, Houben G, Knulst A (2013) House dust mite (Derp 10) and crustacean allergic patients may be at risk when consuming food containing mealworms proteins. *Clinical and Translational Allergy* **3** (Suppl. 3), 48.

Verkerk MC, Tramper J, van Trijp JCM, Martens DE (2007) Insect cells for human food. *Biotechnology Advances* **25**(2), 198-202.

Vijver M, Jager T, Posthuma L, Peijnenburg W (2003) Metal uptake from soils and soilsediment mixtures by larvae of *Tenebrio molitor* (L.) (Coleoptera). *Ecotoxicol Environ Saf* **54**(3), 277-89. [In eng]

Wilson ME, Lorente CA, Allen JE, Eberhard ML (2001) *Gongylonema* infection of the mouth in a resident of Cambridge, Massachusetts. *Clin Infect Dis* **32**(9), 1378-80. [In eng]

Wisniewski HM, Sigurdarson S, Rubenstein R, Kascsak RJ, Carp RI (1996) Mites as vectors for scrapie. *Lancet* **347**(9008), 1114. [In eng]

Yew KL, Kok VS (2012) Exotic food anaphylaxis and the broken heart: sago worm and takotsubo cardiomyopathy. *Med J Malaysia* **67**(5), 540-1. [In eng]

Yi L, Lakemond CMM, Sagis LMC, Eisner-Schadler V, van Huis A, Boekel MAJSV (2013) Extraction and characterisation of protein fractions from five insect species. *Food Chemistry* **141**(4), 3341-3348.

Zagrobelny M, Bak S, Rasmussen AV, Jørgensen B, Naumann CM, Møller BL (2004) Cyanogenic glucosides and plant-insect interactions. *Phytochemistry* **65**(3), 293-306.

Zhou J, Han D (2006) Safety evaluation of protein of silkworm (*Antheraea pernyi*) pupae. *Food and Chemical Toxicology* **44**(7), 1123-1130.

Zhuang P, Zou H, Shu W (2009) Biotransfer of heavy metals along a soil-plant-insect-chicken food chain: field study. *J Environ Sci (China)* **21**(6), 849-53. [In eng]

Annexe 1 : Textes réglementaires en relation avec les insectes

▪ Concernant l'élevage des insectes :

En France, il n'existe actuellement aucune législation s'appliquant à l'élevage et la commercialisation d'insectes comestibles. Néanmoins, il en existe une concernant l'élevage des espèces non domestiques ou sauvages⁹. D'après le Code de l'environnement, tout élevage lucratif de quelque espèce non domestique que ce soit est soumis à une obligation de certificat de capacité d'élevage et autorisation préfectorale d'ouverture d'établissement d'élevage. Les insectes étant des espèces non domestiques, ils relèvent de la réglementation "faune sauvage captive" : ainsi le fait d'exploiter un établissement d'élevage professionnel d'insectes nécessite l'octroi préalable d'un certificat de capacité d'élevage et une autorisation préfectorale d'ouverture évoquées aux articles L.413-2 et 3 du code de l'environnement. Pour accéder à ce double régime d'autorisation, il est également nécessaire d'attester d'une certaine expérience et connaissance préalable concernant les espèces sollicitées, en vertu de l'arrêté du 12 décembre 2000. A noter qu'il n'existe aucune mesure nationale de protection animale spécifique aux insectes élevés en captivité.

Concernant les règles d'hygiène s'appliquant à la production d'animaux pour la consommation humaine, il s'agit des règles générales établies par le paquet hygiène, et plus précisément par le règlement (CE) n°178/2002 visant l'innocuité pour l'homme. Le paquet hygiène s'applique à toutes les étapes de la production, de la transformation et de la distribution des denrées alimentaires¹⁰ et des aliments pour animaux¹¹, incluant implicitement aussi les insectes.

Les producteurs et distributeurs d'insectes et/ou de produits à base d'insectes relèvent du règlement européen sur l'hygiène des denrées alimentaires (Règlement (UE) n°852/2004 2004), plus précisément celles d'origine animale (Règlement (UE) n°854/2004 2004) et des aliments pour animaux (Règlement

⁹ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-etablissements-d-elevage-et.html>

Arrêté du 10 août 2004 fixant les règles générales de fonctionnement des installations d'élevage d'agrément d'animaux d'espèces non domestiques.

¹⁰ Denrée alimentaire : toute substance ou produit, transformé, partiellement transformé ou non transformé, destiné à être ingéré ou raisonnablement susceptible d'être ingéré par l'être humain.

¹¹ Aliment pour animaux : toute substance ou produit, y compris les additifs, transformé, partiellement transformé ou non transformé, destiné à l'alimentation des animaux par voie orale.

(UE) n°183/2005 2005). Les principes HACCP (Analyse des dangers - points critiques pour leur maîtrise) doivent être appliqués.

Quant à l'alimentation des animaux d'élevage destinés à la production d'aliments, la législation dit qu'ils ne peuvent être élevés que sur des substrats autorisés. En effet, conformément à l'article 3.6 du règlement (CE) n°1069/2009, « tout animal détenu, engraisé ou élevé par les êtres humains et utilisé pour la production d'aliments » est un animal d'élevage (Règlement (UE) n°1069/2009 2009). En particulier, ces animaux ne peuvent pas être alimentés avec des matières premières interdites en alimentation animale telles que :

- le lisier ou fumier (annexe III du règlement (CE) n°767/2009),
- le bois traité (annexe III du règlement (CE) n°767/2009),
- les déchets de cuisine et de table (article 11.1 b) du règlement (CE) n°1069/2009).

En revanche, les déchets provenant de la production de bioéthanol, tels que les protéines de blé et les résidus d'orge, sont répertoriés dans le catalogue des matières premières (Règlement (UE) n°68/2013 2013) et pourraient donc être utilisés comme substrats pour élever des insectes.

▪ Concernant les insectes pour l'alimentation des animaux :

Le Règlement (UE) n°68/2013 (2013), cité ci-dessus, prévoit également que les insectes puissent constituer des matières premières pour l'alimentation des animaux. Il cite « les invertébrés terrestres entiers ou non autres que les espèces pathogènes pour l'être humain ou les animaux ». La réglementation sur les substances indésirables dans les aliments pour animaux (Directive 2002/32/CE 2002) n'exclut pas les insectes qui, en tant que matière première, sont donc soumis à ses exigences.

La réglementation des produits formulés à base d'animaux (Règlement (UE) n°1069/2009 2009) est aussi d'application y compris pour les produits importés en Europe. Selon ce dernier texte, les invertébrés, donc les insectes, non pathogènes pour l'homme sont considérés comme des matières de catégorie 3 et peuvent :

- être utilisés pour l'alimentation des animaux de rente s'ils ont été transformés en protéines hydrolysées via un processus validé d'hydrolyses chimiques ;
- être utilisés en aliments pour animaux de compagnie (*petfood*) sous certaines conditions de transformation.

Ils peuvent être utilisés tels quels pour les animaux à fourrure, animaux de zoo, animaux de cirque et autres animaux sauvages détenus (avec obtention préalable d'une dérogation nationale et après autorisation spécifique des utilisateurs finaux, le producteur devant être déclaré aussi).

Le Règlement (UE) n°999/2001 (2001) interdit l'utilisation des protéines animales transformées (PAT) pour les animaux de rente (les protéines animales transformées sont issues exclusivement de sous-produits provenant d'animaux propres à la consommation humaine (catégorie 3)). Depuis le 1^{er} juin 2013, les PAT provenant de non-ruminants ont été réintroduites dans l'alimentation des espèces aquacoles (Règlement (UE) n°56/2013 2013). Les PAT sont produites à partir de sous-produits collectées dans des abattoirs et transformés dans des usines de sous-produits, ce qui exclut les insectes. Si la législation venait à évoluer, l'utilisation des protéines animales transformées à base d'insectes se limiterait aux non-ruminants (porcs, volailles, poissons) et l'interdiction pour les ruminants demeurerait en place.

▪ Concernant les insectes pour l'alimentation humaine :

Le Règlement (UE) n°258/97 (1997) « relatif aux nouveaux aliments et aux nouveaux ingrédients alimentaires » stipule que les aliments qui n'ont pas été consommés à un degré significatif dans l'Union européenne avant le 15 mai 1997 doivent subir une évaluation des risques avant leur commercialisation. Actuellement, ce règlement est ambigu quant à l'interprétation du « degré significatif » de la consommation. De plus, il est imprécis dans sa rédaction actuelle car il ne vise dans son champ d'application que les parties d'animaux (« ingrédients alimentaires isolés à partir d'animaux »), et non les insectes entiers.

À l'heure actuelle, ce sont les organismes des États membres chargés d'évaluer une demande d'autorisation préalable à la mise sur le marché, qui interviennent en premier lieu. Il s'agit de la DGCCRF pour la France. Lorsque un aliment est considéré par la DGCCRF comme entrant dans le champ d'application du Règlement n°258/97, elle émet un avis, en s'appuyant sur l'expertise de l'Anses (favorable ou défavorable, avec ou sans réserves et conditions), sous forme d'un rapport d'évaluation initiale qui est transmis à la Commission Européenne. La Commission diffuse ensuite ce rapport d'évaluation initiale à l'ensemble des États membres, pour commentaires et objections. Si aucune objection de sécurité motivée n'est soumise, l'avis de la DGCCRF est entériné et le nouvel aliment peut être mis ou non sur le marché. Si des objections de sécurité motivées, ou

d'autres objections sur les conclusions de l'avis sont présentées, une décision de la Commission portant autorisation de mise sur le marché est requise, ce qui suppose dans la plupart des cas une évaluation supplémentaire menée par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA). Les nouveaux aliments autorisés ou refusés pour la mise sur le marché européen font l'objet d'une publicité de la part de l'U.E. Un nouvel aliment autorisé peut être proposé dans tous les Etats Membres.

A ce jour, aucun dossier recevable de demande d'autorisation de mise sur le marché n'a été déposé en Europe pour des insectes ou produits à base d'insectes destinés à l'alimentation humaine. Par conséquent, aucun insecte, ni dérivé d'insecte, ne peut être mis sur le marché pour l'alimentation humaine.

Le projet de nouveau règlement relatif aux nouveaux aliments (COM (2007) 872 2007) a pour objet de rationaliser la procédure d'autorisation ainsi que d'améliorer son efficacité et sa transparence. Il introduit une méthode d'évaluation de la sécurité à la fois plus rapide et mieux adaptée aux aliments traditionnels qui proviennent de pays tiers et dont l'innocuité d'utilisation passée est attestée. En vertu de ce règlement, il est probable que les insectes appartiendront à cette catégorie qui englobe la nourriture qui a été une composante du régime alimentaire normal pendant au moins une génération d'une grande proportion de la population de pays tiers. Si le pétitionnaire est apte à fournir les données documentées afin de démontrer que le nouvel aliment a un antécédent d'utilisation en toute sécurité sanitaire dans un pays tiers, il pourra être autorisé à être mis sur le marché. Le cas échéant, le pétitionnaire devra recourir à une appréciation des risques

ANNEXE 4 : Texte officiel publié dans le JO du sénat français le 02 Mars 2017 afin de sécuriser la vente des insectes comestibles pour l'homme :

Un texte officiel publié dans le JO du sénat français le 02 Mars 2017 afin de sécuriser la vente des insectes comestibles pour l'homme :

« (...)La mise sur le marché d'insectes pour la consommation humaine entre dans le champ d'application du règlement (Commission européenne -CE) n° 258/97 sur les nouveaux aliments (règlement « Novel Food »). Ce règlement soumet, depuis le 15 mai 1997, tout nouvel aliment à une autorisation communautaire avant sa mise sur le marché. Cette autorisation est délivrée nominativement à un opérateur pétitionnaire et repose sur l'instruction d'un dossier présentant notamment une évaluation des risques démontrant l'innocuité de la denrée. Le statut de « nouvel aliment » est établi sur la base de l'absence d'historique de consommation en Europe avant 1997. Des enquêtes ont eu lieu en 2010/2011 en Europe afin d'établir un éventuel historique de consommation d'insectes. Elles ont conclu en l'absence d'historique. De plus, le nouveau règlement Novel Food approuvé par le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne (UE) en décembre 2015 (UE n° 2283/2015) qui remplacera le règlement CE n° 258/97 à compter du 1er janvier 2018, prévoit que les insectes entiers et les préparations à base d'insectes sont clairement considérés comme nouveaux aliments et ne peuvent être mis sur le marché sans autorisation européenne préalable. Par ailleurs, l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation française (ANSES) a rendu le 12 février 2015 un avis relatif aux risques sanitaires en lien avec la consommation d'insectes. Elle note que « l'analyse complète des dangers pour les insectes en alimentation humaine doit être menée telle que préconisée dans le règlement sur les nouveaux aliments (CE) n° 258/97 ». Dans ses conclusions, l'ANSES précise bien que « les insectes vivants et transformés peuvent être considérés comme des réservoirs et/ou des vecteurs potentiels d'agents biologiques (et de leurs toxines), chimiques et physiques susceptibles d'affecter la santé de l'homme et de l'animal lors d'une consommation directe ou indirecte via l'alimentation des animaux de rente ». Il convient de noter à cet égard que des professionnels français ont constitué et déposé un dossier auprès de la direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes. Celui-ci a été transmis à l'ANSES et a fait l'objet d'une demande d'informations complémentaires de la part de cette agence. En conclusion et au regard des textes en vigueur au sein de l'UE, aucune commercialisation d'insectes destinés à la consommation humaine n'est possible sans autorisation préalable de la CE sur le territoire de l'UE. (...)

ANNEXE 5: Les 27 principes pour l'agriculture durable ratifiés à Rio en Juin 1992

Les 27 principes pour l'agriculture durable ratifiés à Rio en Juin 1992

PRINCIPE 1

Les êtres humains sont au centre des préoccupations relatives au développement durable. Ils ont droit à une vie saine et productive en harmonie avec la nature.

PRINCIPE 2

Conformément à la Charte des Nations Unies et aux principes du droit international, les États ont le droit souverain d'exploiter leurs propres ressources selon leur politique d'environnement et de développement, et ils ont le devoir de faire en sorte que les activités exercées dans les limites de leur juridiction ou sous leur contrôle ne causent pas de dommages à l'environnement dans d'autres États ou dans des zones ne relevant d'aucune juridiction nationale.

PRINCIPE 3

Le droit au développement doit être réalisé de façon à satisfaire équitablement les besoins relatifs au développement et à l'environnement des générations présentes et futures.

PRINCIPE 4

Pour parvenir à un développement durable, la protection de l'environnement doit faire partie intégrante du processus de développement et ne peut être considérée isolément.

PRINCIPE 5

Tous les Etats et tous les peuples doivent coopérer à la tâche essentielle de l'élimination de la pauvreté, qui constitue une condition indispensable du développement durable, afin de réduire les différences de niveaux de vie et de mieux répondre aux besoins de la majorité des peuples du monde.

PRINCIPE 6

La situation et les besoins particuliers des pays en développement, en particulier des pays les moins avancés et des pays les plus vulnérables sur le plan de l'environnement, doivent se voir accorder une priorité spéciale. Les actions internationales entreprises en matière d'environnement et de développement devraient également prendre en considération les intérêts et les besoins de tous les pays.

PRINCIPE 7

Les Etats doivent coopérer dans un esprit de partenariat mondial en vue de conserver, de protéger et de rétablir la santé et l'intégrité de l'écosystème terrestre. Etant donné la diversité des rôles joués dans la dégradation de l'environnement mondial, les Etats ont des responsabilités communes mais différenciées. Les pays développés admettent la responsabilité qui leur incombe dans l'effort international en faveur du développement durable, compte tenu des pressions que leurs sociétés exercent sur l'environnement mondial et des techniques et des ressources financières dont ils disposent.

PRINCIPE 8

Afin de parvenir à un développement durable et à une meilleure qualité de vie pour tous les peuples, les Etats devraient réduire et éliminer les modes de

production et de consommation non viables et promouvoir des politiques démographiques appropriées.

PRINCIPE 9

Les Etats devraient coopérer ou intensifier le renforcement des capacités endogènes en matière de développement durable en améliorant la compréhension scientifique par des échanges de connaissances scientifiques et techniques et en facilitant la mise au point, l'adaptation, la diffusion et le transfert de techniques, y compris de techniques nouvelles et novatrices.

PRINCIPE 10

La meilleure façon de traiter les questions d'environnement est d'assurer la participation de tous les citoyens concernés, au niveau qui convient. Au niveau national, chaque individu doit avoir dûment accès aux informations relatives à l'environnement que détiennent les autorités publiques, y compris aux informations relatives aux substances et activités dangereuses dans leurs collectivités, et avoir la possibilité de participer aux processus de prise de décision. Les Etats doivent faciliter et encourager la sensibilisation et la participation du public en mettant les informations à la disposition de celui-ci. Un accès effectif à des actions judiciaires et administratives, notamment des réparations et des recours, doit être assuré.

PRINCIPE 11

Les Etats doivent promulguer des mesures législatives efficaces en matière d'environnement. Les normes écologiques et les objectifs et priorités pour la gestion de l'environnement devraient être adaptés à la situation en matière d'environnement et de développement à laquelle ils s'appliquent. Les normes appliquées par certains pays peuvent ne pas convenir à d'autres pays, en particulier à des pays en développement, et leur imposer un coût économique et social injustifié.

PRINCIPE 12

Les Etats devraient coopérer pour promouvoir un système économique international ouvert et favorable, propre à engendrer une croissance économique et un développement durable dans tous les pays, qui permettrait de mieux lutter contre les problèmes de dégradation de l'environnement. Les mesures de politique commerciale motivées par des considérations relatives à l'environnement ne devraient pas constituer un moyen de discrimination arbitraire ou injustifiable, ni une restriction déguisée aux échanges internationaux. Toute action unilatérale visant à résoudre les grands problèmes écologiques au-delà de la juridiction du pays importateur devrait être évitée. Les mesures de lutte contre les problèmes écologiques transfrontières ou mondiaux devraient, autant que possible, être fondées sur un consensus international.

PRINCIPE 13

Les Etats doivent élaborer une législation nationale concernant la responsabilité de la pollution et d'autres dommages à l'environnement et l'indemnisation de leurs victimes. Ils doivent aussi coopérer diligemment et plus résolument pour développer davantage le droit international concernant la responsabilité et l'indemnisation en cas d'effets néfastes de dommages causés à l'environnement dans des zones situées au-delà des limites de leur juridiction par des activités menées dans les limites de leur juridiction ou sous leur contrôle.

PRINCIPE 14

Les Etats devraient concerter efficacement leurs efforts pour décourager ou prévenir les déplacements et les transferts dans d'autres Etats de toutes activités et substances qui provoquent une grave détérioration de l'environnement ou dont on a constaté qu'elles étaient nocives pour la santé de l'homme.

PRINCIPE 15

Pour protéger l'environnement, des mesures de précaution doivent être largement appliquées par les Etats selon leurs capacités. En cas de risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement.

PRINCIPE 16

Les autorités nationales devraient s'efforcer de promouvoir l'internalisation des coûts de protection de l'environnement et l'utilisation d'instruments économiques, en vertu du principe selon lequel c'est le pollueur qui doit, en principe, assumer le coût de la pollution, dans le souci de l'intérêt public et sans fausser le jeu du commerce international et de l'investissement.

PRINCIPE 17

Une étude d'impact sur l'environnement, en tant qu'instrument national, doit être entreprise dans le cas des activités envisagées qui risquent d'avoir des effets nocifs importants sur l'environnement et dépendent de la décision d'une autorité nationale compétente.

PRINCIPE 18

Les Etats doivent notifier immédiatement aux autres Etats toute catastrophe naturelle ou toute autre situation d'urgence qui risque d'avoir des effets néfastes soudains sur l'environnement de ces derniers. La communauté internationale doit faire tout son possible pour aider les Etats sinistrés.

PRINCIPE 19

Les Etats doivent prévenir suffisamment à l'avance les Etats susceptibles d'être affectés et leur communiquer toutes informations pertinentes sur les activités

qui peuvent avoir des effets transfrontières sérieusement nocifs sur l'environnement et mener des consultations avec ces Etats rapidement et de bonne foi.

PRINCIPE 20

Les femmes ont un rôle vital dans la gestion de l'environnement et le développement. Leur pleine participation est donc essentielle à la réalisation d'un développement durable.

PRINCIPE 21

Il faut mobiliser la créativité, les idéaux et le courage des jeunes du monde entier afin de forger un partenariat mondial, de manière à assurer un développement durable et à garantir à chacun un avenir meilleur.

PRINCIPE 22

Les populations et communautés autochtones et les autres collectivités locales ont un rôle vital à jouer dans la gestion de l'environnement et le développement du fait de leurs connaissances du milieu et de leurs pratiques traditionnelles. Les Etats devraient reconnaître leur identité, leur culture et leurs intérêts, leur accorder tout l'appui nécessaire et leur permettre de participer efficacement à la réalisation d'un développement durable.

PRINCIPE 23

L'environnement et les ressources naturelles des peuples soumis à oppression, domination et occupation doivent être protégés.

PRINCIPE 24

La guerre exerce une action intrinsèquement destructrice sur le développement durable. Les Etats doivent donc respecter le droit international relatif à la protection de l'environnement en temps de conflit armé et participer à son développement, selon que de besoin.

PRINCIPE 25

La paix, le développement et la protection de l'environnement sont interdépendants et indissociables.

PRINCIPE 26

Les Etats doivent résoudre pacifiquement tous leurs différends en matière d'environnement, en employant des moyens appropriés conformément à la Charte des Nations Unies.

PRINCIPE 27

Les Etats et les peuples doivent coopérer de bonne foi et dans un esprit de solidarité à l'application des principes consacrés dans la présente Déclaration et au développement du droit international dans le domaine du développement durable.

Université de Lille
FACULTE DE PHARMACIE DE LILLE
DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE
Année Universitaire 2018/2019

Nom : Dubois

Prénom : Emilie

Titre de la thèse : Les nématodes parasites des plantes: description, moyens de lutte et impact sur la faim dans le monde

Mots-clés : Nématodes phytoparasites, nématodes à kystes, nématodes à galles, faim dans le monde, entomophagie, entomoculture, agriculture durable.

Résumé : Les nématodes phytopathogènes sont des parasites cosmopolites. Ils touchent toutes sortes de végétaux et ont des conséquences dramatiques sur l'alimentation de la population mondiale surtout dans les pays en voie de développement. Je décris donc dans la première partie de cette thèse, la faim dans le monde et ses causes, je développe ensuite dans une seconde partie les différents nématodes phytoparasites avec leur taxonomie, leur morphologie, leur cycle de vie et de reproduction. Dans un troisième temps, je détaille les différents moyens qui existent ou qui sont à l'étude permettant de lutter contre ses parasites. Et pour conclure, je termine par les différentes perspectives d'avenir permettant de lutter contre la faim dans le monde telle que l'entomophagie.

Membres du jury :

Président : M. Courtecuisse Regis, Conservateur et Professeur des Universités, Sciences Végétales et fongiques de la faculté de Pharmacie, Université de Lille

Assesseur : Mme Aliouat-Denis Cécile-Marie, Maître de Conférences, Parasitologie et Mycologie médicale de la faculté de Pharmacie, Université de Lille

Membre extérieur : Mme Descamps Eloise, Pharmacienne à Wavrin
