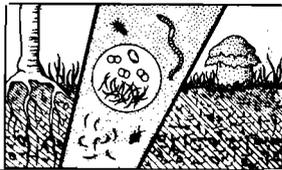


J-C. PROT

INTRODUCTION A LA NEMATOLOGIE



MARS 1984

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

CENTRE DE DAKAR - HANN



INTRODUCTION
A LA NEMATOLOGIE

Par

Jean-Claude PROT

Laboratoire de Nématologie

O.R.S.T.O.M. - B.P. 1386

Dakar - Sénégal.

S O M M A I R E

1. Introduction	1
1.1. Qu'est-ce que la Nématologie ?	1
1.2. Qu'est-ce qu'un Nématode ?	1
1.3. Quelle est leur taille ?	1
1.4. Où les trouve-t-on ?	2
1.5. Quel est leur nombre ?	2
1.6. Quelle est leur importance économique ?	2
2. Morphologie des Nématodes phytoparasites	4
2.1. Morphologie externe	4
2.2. Morphologie interne	6
2.2.1. Le fourreau épidermique-musculaire	6
2.2.2. La cavité générale	9
2.2.3. Le tube digestif des nématodes phytoparasites typiques (Tylenchides).....	9
2.2.4. L'appareil excréteur	12
2.2.5. Le système nerveux	12
2.2.6. L'appareil reproducteur.....	13
3. Les bases de la classification des nématodes phytoparasites	17
3.1. Introduction	17
3.2. Place des nématodes phytoparasites dans le règne animal	17
3.3. La classification des nématodes phytoparasites en familles, genres et espèces	17

4. Techniques d'études	22
4.1. Les objectifs des techniques d'étude	22
4.2. Le prélèvement des échantillons	22
4.3. Extraction des nématodes d'un échantillon de terre	25
4.4. Extraction des nématodes d'un échantillon végétal .	28
4.5. Identification et numération des nématodes d'un échantillon	30
5. Reproduction et cycles de développement	34
5.1. Reproduction	34
5.1.1. Introduction	34
5.1.2. Les différents modes de reproduction	34
5.1.3. Cas des nématodes phytoparasites	34
5.2. Les cycles de développement	35
5.2.1. Introduction	35
5.2.2. Exemple de reproduction par amphimixie : le cycle de développement de <u>Scutellonema</u> <u>cavenessi</u>	36
5.2.3. Exemple de reproduction par parthénogénèse : le cycle de développement des nématodes du genre <u>Meloidogyne</u>	38
6. Ecologie des nématodes phytoparasites	42
6.1. Introduction	42
6.2. La dissémination des nématodes phytoparasites. Les migrations dans le sol	42
6.2.1. La dissémination passive	42
6.2.2. La dissémination active	42
6.2.3. Les migrations dans le sol	43

6.3. Les facteurs influençant la répartition des nématodes phytoparasites	43
6.3.1. Les plantes hôtes	43
6.3.2. Les paramètres physiques liés au climat	43
6.3.3. Les paramètres physiques et chimiques du sol	43
7. Les relations hôte-parasite. La pathogénie	51
7.1. Les différents modes de parasitismes	51
7.1.1. Les ectoparasites	51
7.1.2. Les endoparasites migrants	51
7.1.3. Les semi-endoparasites	
7.1.4. Les endoparasites sédentaires	51
7.2. Les causes de l'effet pathogène	51
7.3. Mise en évidence de l'effet pathogène	52
7.3.1. Diagnostique d'une attaque par les nématodes du genre <u>Meloidogyne</u>	53
7.3.2. Mise en évidence de l'effet pathogène des nématodes phytoparasites, autres que <u>Meloidogyne</u>	53
8. Les méthodes de lutte	55
8.1. Introduction	55
8.2. La prévention	55
8.2.1. Prévention de la dissémination	55
8.2.2. Aménagement et entretien des surfaces cultivées	56
8.3. Les moyens de lutte	56
8.3.1. La lutte chimique	56
8.3.2. La lutte physique	58
8.3.3. Les rotations	58
8.4. Conclusion	59

Chapitre N° 1

Introduction

1.1. Qu'est-ce que la Nématologie ?

La Nématologie est tout à la fois l'étude et la connaissance des nématodes ainsi que la mise en pratique de ces connaissances.

Un certain nombre de nématodes vivent dans le sol en parasitant les racines des plantes cultivées, ce qui les endommage et diminue notablement leur rendement.

Ainsi en tant que science consacrée à une catégorie particulière d'agents phytopathogènes, elle prend place à côté de disciplines telles que l'Entomologie agricole, la Mycologie, la Virologie et la Bactériologie, l'ensemble constituant la Phytopathologie.

1.2. Qu'est-ce qu'un Nématode ?

Un nématode est un vers rond, généralement allongé en fuseau (Figure 1).

Il est pourvu d'une organisation simplifiée qui comprend :

- Un fourreau épidermo-musculaire délimitant une cavité générale.
- Un tube digestif composé d'un appareil buccal, d'un oesophage et d'un intestin se terminant par un anus ouvert sur l'extérieur.
- Un appareil reproducteur
- Un système nerveux et un appareil excréteur simplifiés.

1.3. Quelle est leur taille ?

La plupart sont de taille microscopique de 0,3 à 5 mm de longueur sur 0,01 à 0,1 mm de diamètre. Certaines espèces, en particulier les parasites des mammifères, peuvent être beaucoup plus grandes; c'est le cas de l'*Ascaris* qui peut mesurer 25 cm de longueur.

1.4. Où les trouve-t-on ?

Ils sont présents sous toutes les latitudes, à toutes les altitudes et toutes les profondeurs aussi bien dans le sol, les eaux douces que les océans. Certains vivent libres en se nourrissant de la matière organique en décomposition. D'autres sont prédateurs, vivant aux dépens de bactéries, de champignons ou d'autres nématodes. Beaucoup sont des parasites obligés de l'homme, des mammifères, des oiseaux, des reptiles, des poissons, des insectes ou des végétaux. On peut donc dire que cette classe d'animaux a conquis la planète terre et tout ce qui vit sur cette planète. On en trouve même dans le vinaigre ou la farine avariée.

1.5. Quel est leur nombre ?

Ce sont les métazoaires les plus nombreux sur terre. Les 40 premiers cm d'un sol cultivé peuvent en contenir jusqu'à 10 millions par m².

1.6. Quelle est leur importance économique ?

Les nématodes libres qui se nourrissent de matière organique en décomposition semblent plutôt avoir un rôle bénéfique en participant au processus de décomposition.

Les nématodes parasites d'insectes peuvent avoir une influence positive en limitant les pullulations d'insectes nuisibles.

Les nématodes zooparasites vivant aux dépens de l'homme et des animaux domestiques ont une très grande importance économique ; leur étude se fait dans le cadre de la parasitologie.

Les nématodes phytoparasites, parasites des plantes cultivées, présentent eux aussi une très grande importance économique ; c'est leur étude plus celles concernant les nématodes libres, les nématodes prédateurs et les nématodes parasites d'insectes qui font l'objet de la nématologie.

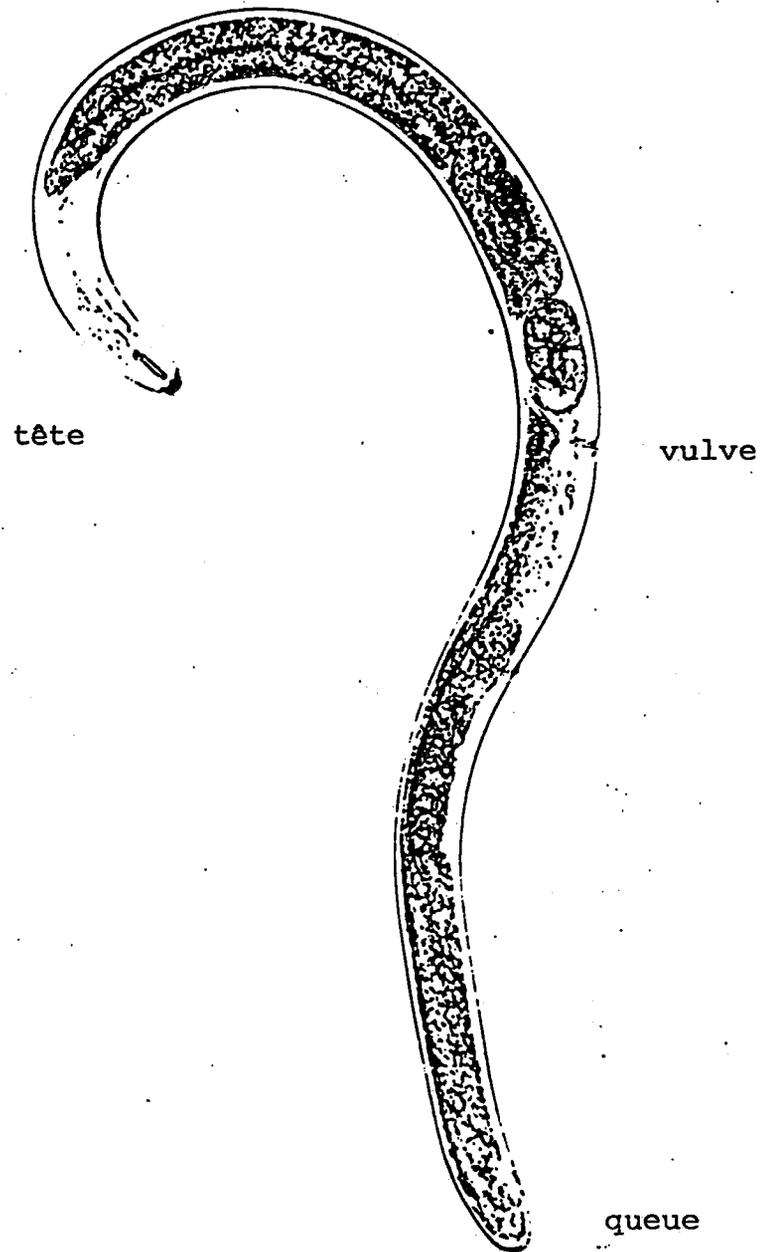


Figure 1 : Femelle du nématode Scutellonema cavenessi.
(Demeure, Y., Netscher C., & Quénéhervé, P.
(1980). Revue Nématol. 3 ; 213-226.

Chapitre N° 2

Morphologie des Nématodes Phytoparasites.

2.1. Morphologie externe.

Les nématodes phytoparasites ont généralement une forme en fuseau allongé plus ou moins effilé aux extrémités et de section transversale circulaire (Figure 1). Ils sont généralement incolores et transparents. Chez quelques espèces les femelles ont un corps volumineux et piriforme ceci, étant provoqué par un développement important des gonades et de leurs annexes. Les mâles sont toujours vermiformes.

La plupart sont invisibles à l'oeil nu ; ils mesurent de 0,3 à 5 mm de longueur et 10 à 50 μ m de largeur.

La région ventrale est facilement reconnaissable étant caractérisée par la présence d'un pore excréteur, de la vulve et de l'anús. Le pore excréteur est situé dans le tiers antérieur du corps. La vulve est médiane chez les individus pourvus de 2 gonades et le plus souvent située vers l'arrière du corps chez les espèces n'en possédant qu'une.

On distingue une région céphalique plus ou moins différenciée et caractérisée par la présence de six lèvres. La région caudale ou postanale est généralement mieux différenciée (plus effilée) que la région céphalique.

L'enveloppe externe ou cuticule peut être lisse, annelée, ponctuée ou marquée de stries longitudinales ; (Figure 2) les anneaux cuticulaires présentent parfois des excroissances fortement développées. La cuticule est marquée de plis longitudinaux qui délimitent les champs latéraux. Sur la cuticule on peut aussi distinguer les terminaisons des organes de perception ; ce sont les amphides et les papilles situées dans la région céphalique et les phasmides souvent localisées à l'arrière du corps.

Les mâles possèdent généralement des ailes (ou bursae) caudales servant d'organes de préhension lors de la copulation ; ce sont des expansions cuticulaires.

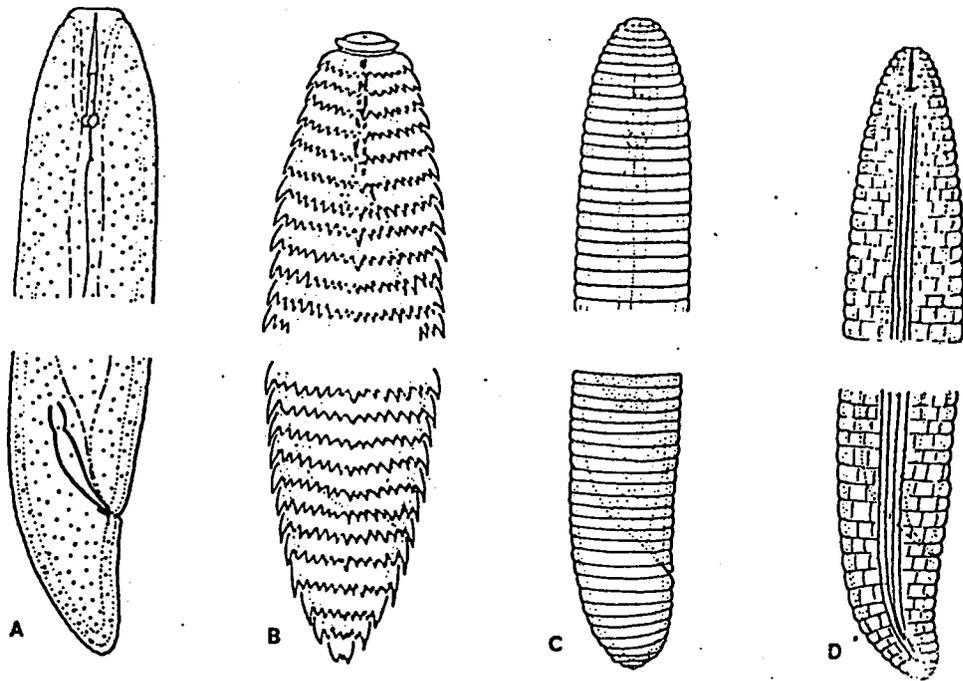


Figure 2 : Différents aspects de la cuticule des nématodes phyto-
parasites : A - ponctuée ; B - annelée avec anneaux
possédant des extensions cuticulaires ; C - annelée ;
D - annelée avec stries longitudinales et incisures
dans le champ latéral. (Ayoub S.M. (1977). Plant nema-
tology an agricultural training aid.

2.2. Morphologie interne.

2.2.1. Le fourreau épidermique-musculaire.

La paroi du corps des nématodes est constituée de trois couches intimement liées, ce sont de l'extérieur vers l'intérieur la cuticule, l'épiderme et la couche musculaire longitudinale (Figure 3).

2.2.1.1. La cuticule.

La cuticule est constituée de 8 ou 9 couches entrecroisées (Figure 3) de protéines fibreuses. Elle doit être suffisamment solide pour protéger le nématode, assez rigide pour former un exosquelette et dans le même temps assez souple pour permettre les mouvements.

2.2.1.2. L'épiderme.

L'épiderme sécrète la cuticule. Il est formé d'une couche unique constituée d'un petit nombre de rangées de cellules épithéliales. Il entoure totalement le corps et renferme de nombreuses réserves (lipides et glycogène). L'épiderme n'est pas d'épaisseur égale ; il forme des cordes longitudinales qui sont des bandes faisant saillie dans la cavité générale (Figure 4). Il y a généralement 4 cordes : 1 dorsale, 1 ventrale et 2 latérales plus fortement marquées que les précédentes.

2.2.1.3. La musculature.

La musculature se situe immédiatement en-dessous de l'épiderme. Il n'y a qu'une couche de muscles longitudinaux. Cette musculature est divisée en quatre champs musculaires par les cordes latérales et médianes.

Les nématodes se meuvent suite à des contractions coordonnées des muscles longitudinaux qui, à quelques exceptions près, induisent un mouvement ondulatoire.

S'il n'y a pas de couche musculaire circulaire il existe néanmoins des muscles transversaux ; ce sont les muscles copulateurs, les muscles vulvaires et les muscles anaux.

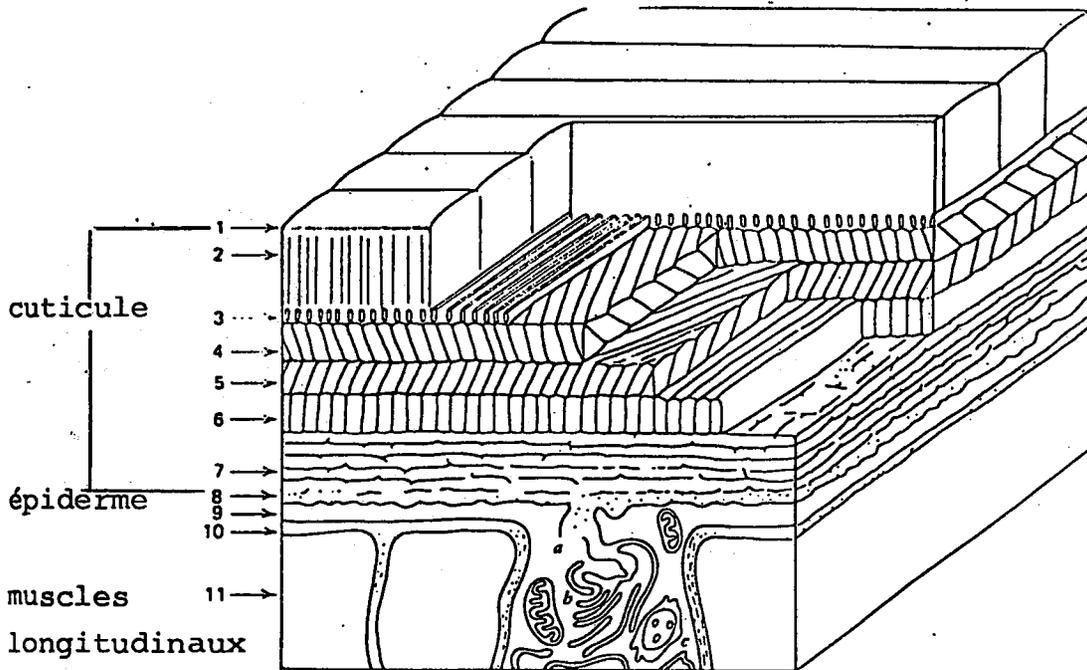
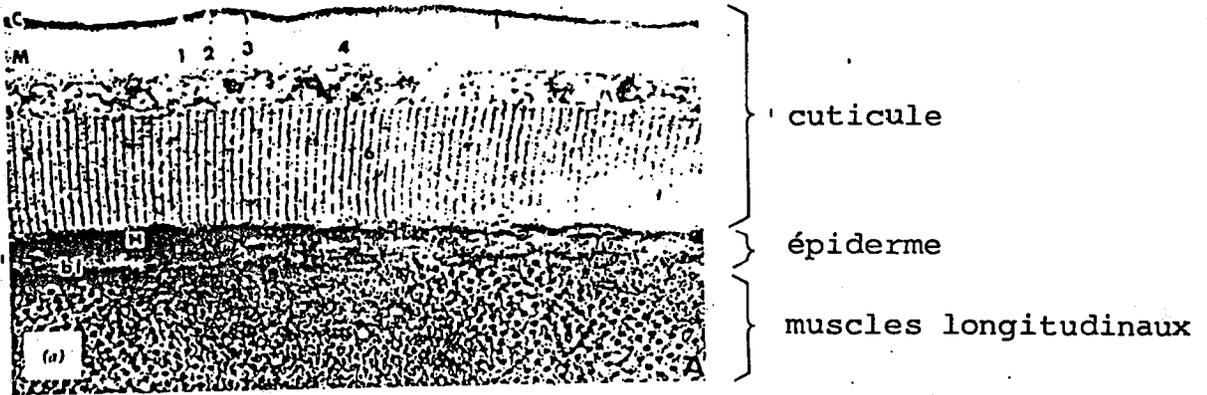


Figure 3 : Structure de la paroi du corps des nématodes (Dropkin, V.H. (1980). Introduction to plant nematology.

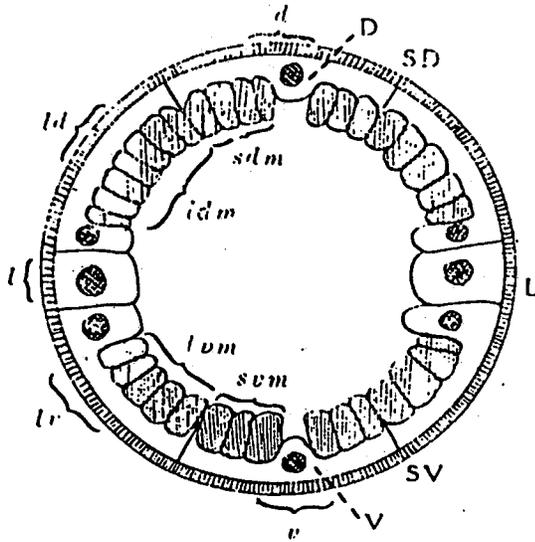


Figure 4 : Coupe transversale du tube épidermique-musculaire
 D : corde dorsale ; L : corde latérale ;
 ldm + sdm : champ musculaire latéro-dorsal ;
 lvm + svm : champ musculaire latéro-ventral.
 (Filipjev).

2.2.2. La cavité générale.

La cavité générale du corps des nématodes contient un tissu fibreux et des cellules mésenchymateuses et est remplie d'un liquide de pression osmotique élevée qui agissant sur l'exosquelette fait que les nématodes conservent leur forme en fuseau.

2.2.3. Le tube digestif des nématodes phytoparasites typiques (Tylenchides).

Le tube digestif (Figure 5) s'étend de la bouche à l'anus. Il comprend l'oesophage, l'intestin et le rectum.

2.2.3.1. La cavité buccale.

La bouche s'ouvre à l'extrémité antérieure ; elle est pourvue d'un stylet (Figure 6), structure cuticulaire durcie, analogue à une aiguille hypodermique. Des muscles protracteurs insérés d'une part sur les boutons basaux du stylet et d'autre part à l'avant du corps permettent au stylet de faire saillie à l'extérieur de la bouche. Ce stylet permet aux nématodes phytoparasites de perforer les parois des cellules et d'en prélever le contenu dont ils se nourrissent. Le conduit oesophagien part de l'extrémité postérieure du stylet.

2.2.3.2. L'oesophage (Figure 6).

La partie antérieure de l'oesophage est plus ou moins cylindrique ; elle est divisée en un procorpus et un métacorpus aussi appelé bulbe médian. Ce bulbe médian contient une valve sur laquelle s'insèrent des muscles ; il fonctionne comme une pompe qui aspire les aliments à travers le stylet et les refoule dans l'intestin.

L'isthme, partie à section étroite, relie le métacorpus au bulbe basal piriforme. Ce bulbe basal contient trois glandes, une dorsale et deux subventrales. La glande dorsale sécrète une "salive". Un canal qui traverse le bulbe médian, la relie au conduit oesophagien ; le débouché de ce canal dans le conduit oesophagien est appelé orifice de la glande dorsale et situé près de la base du stylet.

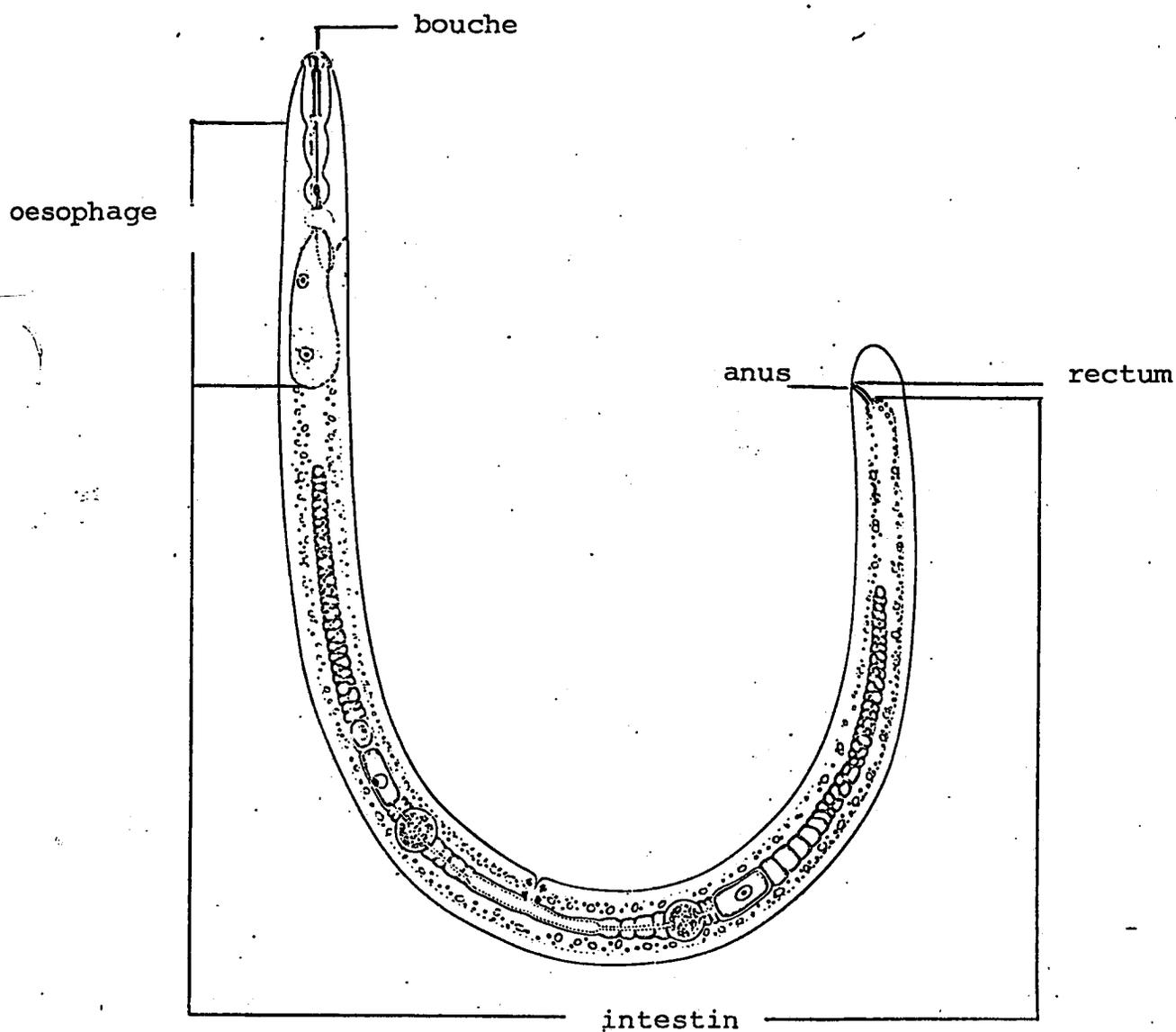


Figure 5 : Tube digestif des nématodes phytoparasites.
(Siddiqi, M.R. (1974). CIH. Descriptions of
Plant-parasitic nematodes 5 et 3, n° 33).

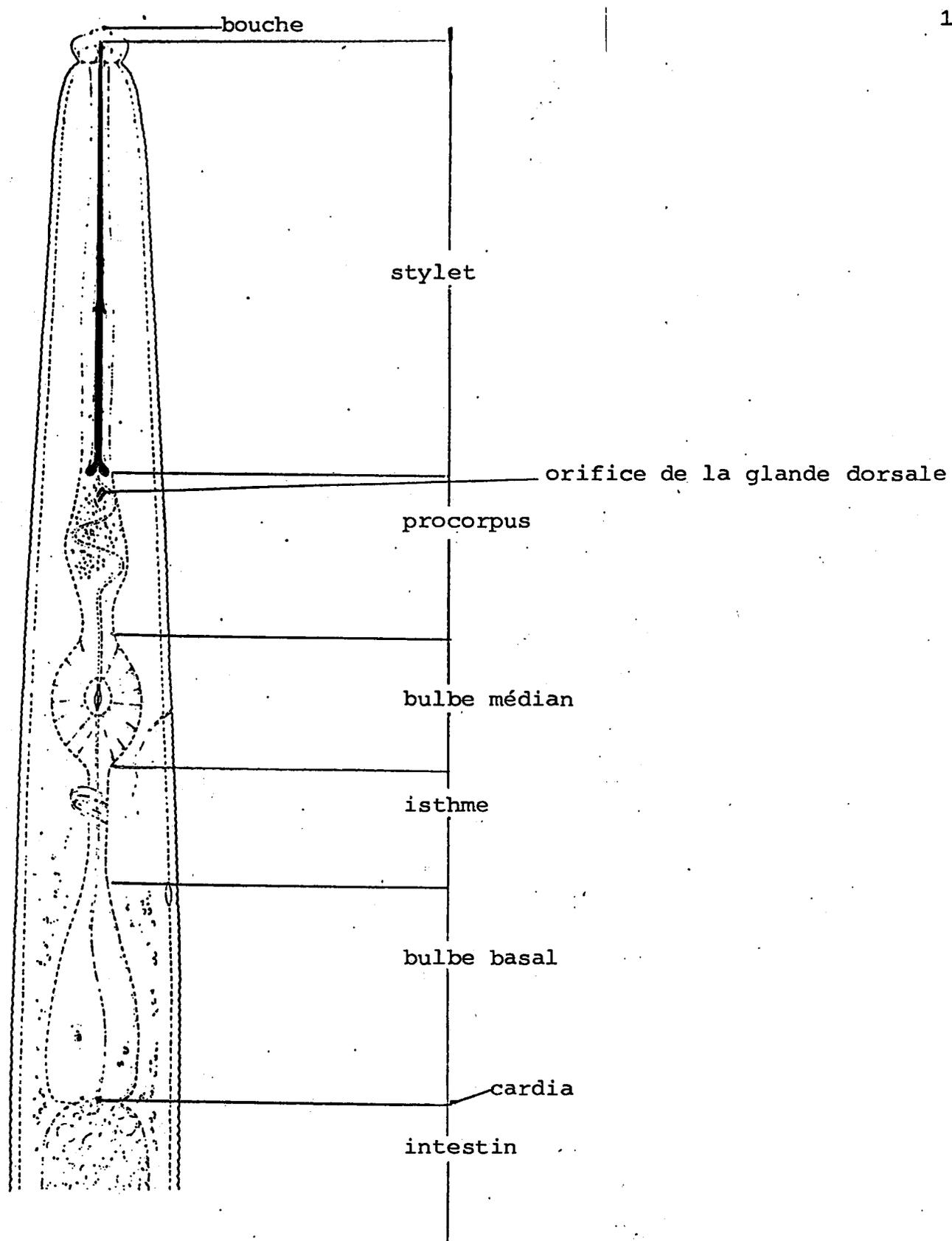


Figure 6 : Oesophage des Tylenchides.

(Orton Williams, K.J. (1974). CIH. Descriptions of Plant-parasitic nematodes 5 et 4.n° 56.

Le bulbe basal est pourvu d'une valve appelée cardia qui sépare l'oesophage de l'intestin.

2.2.3.3. L'intestin.

L'intestin est un simple tube droit constitué d'une seule couche de cellules épithéliales. Les cellules intestinales cumulent plusieurs fonctions ; elles absorbent les éléments nutritifs, les métabolisent, stockent des réserves et jouent aussi le rôle de cellules excrétrices. L'intestin se termine par un sphincter musculueux qui le sépare du rectum.

Le rectum est une invagination cuticulaire. Celui des femelles est un simple tube qui conduit à l'anus. Chez les mâles le système reproducteur débouche dans le rectum qui est donc transformé en cloaque.

2.2.4. L'appareil excréteur.

L'appareil excréteur des nématodes phytoparasites est constitué de deux longs canaux latéraux connectés entre eux par un canal transversal lui-même en communication avec le pore excréteur généralement situé à la hauteur du bulbe médian.

2.2.5. Le système nerveux.

On distingue un système nerveux central composé de ganglions nerveux, d'un anneau nerveux, d'une corde neurale ventrale et d'une corde neurale dorsale. L'anneau nerveux est la structure la plus facilement distinguable ; il entoure l'oesophage juste en arrière du bulbe médian.

Les différents organes du système nerveux sont connectés entre eux et aux terminaisons nerveuses qui innervent les muscles et les organes des sens.

Les nématodes possèdent aussi des systèmes nerveux sympathiques : un oesophagien, un rectal, un entourant les spicules chez le mâle et un associé à la vulve et au vagin chez les femelles.

Les organes des sens sont concentrés dans la région céphalique et dans la région postérieure ; ce sont :

- Les papilles qui se présentent sous la forme de petites protubérances contenant une fibre nerveuse qui se termine juste sous la surface de la cuticule ou dans une petite cavité ouverte à l'extérieur. Les papilles sont soupçonnées être des mécanorécepteurs et/ou des chimiorécepteurs.
- Les amphides, au nombre de deux, situées latéralement dans la région antérieure, sont des organes combinant des cellules glandulaires et des terminaisons nerveuses. Elles sont des chimiorécepteurs.
- Une paire de phasmides généralement placées dans la région postérieure et qui possèdent une structure analogue à celle des amphides.

2.2.6. L'appareil reproducteur.

La reproduction des nématodes phytoparasites se fait selon deux modes :

- a) reproduction sexuée, la femelle est fécondée par le mâle.
- b) parthénogénèse, les oeufs se développent sans fécondation.

Chez les espèces à reproduction sexuée les mâles sont aussi nombreux que les femelles. Chez les espèces parthénogénétiques les mâles sont rares et manquent quelquefois totalement.

La présence de la vulve d'une part, des spicules et des ailes caudales d'autre part permettent de différencier assez facilement les deux sexes.

2.2.6.1. L'appareil reproducteur femelle.

L'appareil reproducteur femelle consiste en une ou deux branches génitales en forme de tubes allongés. Chez les espèces à deux branches génitales (didelphique) la vulve est généralement médiane et l'on distingue alors une branche génitale antérieure et une branche génitale postérieure. Chez les espèces à une seule branche génitale (monodelphique) la vulve est généralement déplacée vers l'arrière du corps.

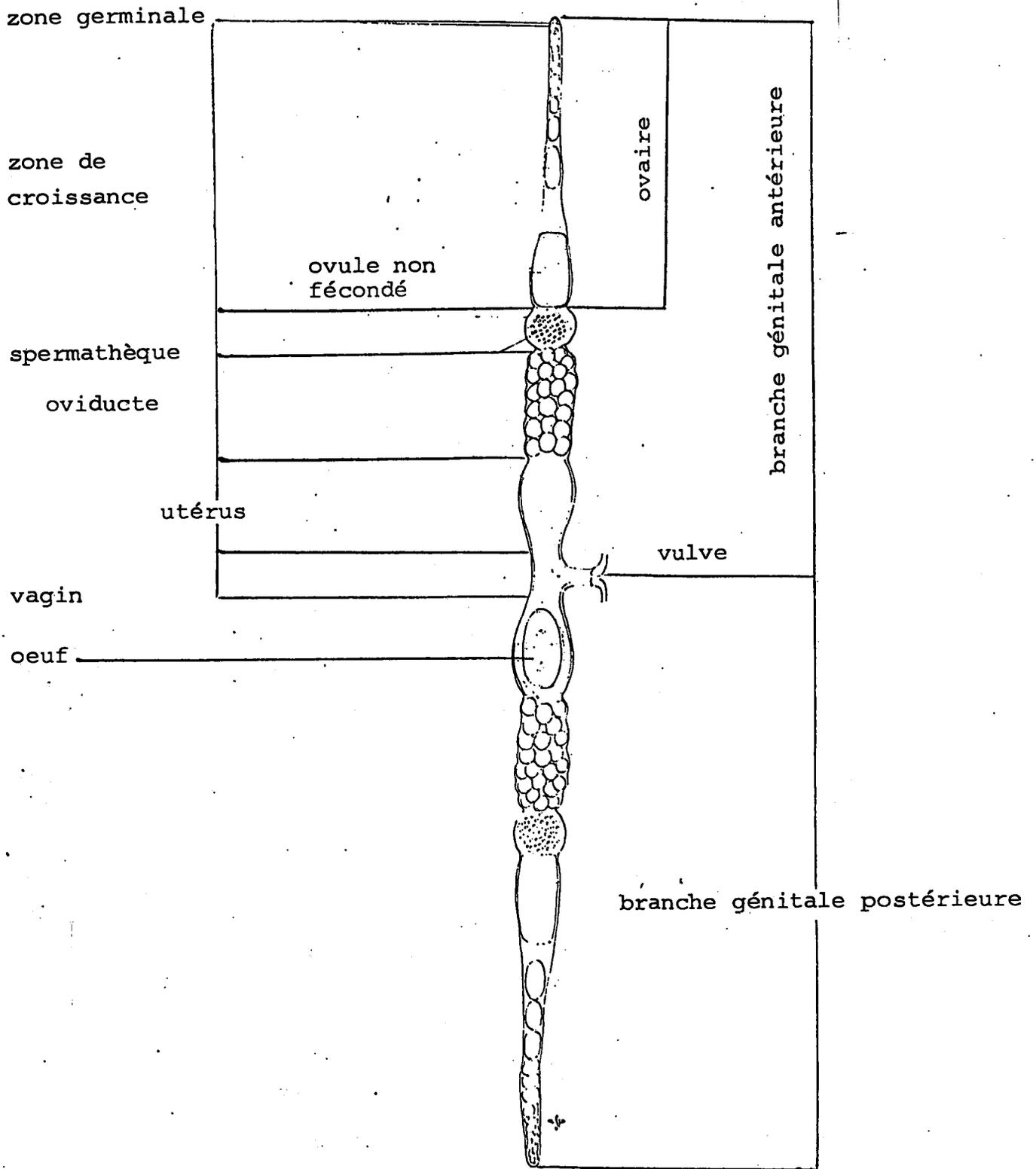


Figure 7 : Appareil reproducteur femelle.

(Ayoub, S.M. (1977). Plant nematology. An agricultural training aid.)

La structure de la branche génitale est la même que les espèces soient didelphiques ou monodelphiques.

La paroi de la branche génitale est constituée d'une couche monocellulaire. La branche génitale est divisée en plusieurs régions distinctes (Figure 7). A l'extrémité se trouve l'ovaire avec une zone germinale (zone de division cellulaire) qui produit les oocytes et une zone de croissance dans laquelle les oocytes se transforment en ovules. Entre l'ovaire et l'oviducte se trouve une spermathèque dans laquelle sont stockés les spermatozoïdes. A l'oviducte fait suite l'utérus où les oeufs finissent leur formation et chez certaines espèces commencent même leur développement embryonnaire. De l'utérus un vagin court et musculéux conduit à la vulve.

2.2.6.2. L'appareil reproducteur mâle.

La branche génitale est construite sur le même modèle (Figure 8) que la branche génitale femelle. A l'extrémité, le testicule avec une zone germinale et une zone de développement fournit les spermatozoïdes qui sont stockés dans une vésicule séminale. Le canal déférent unit la vésicule séminale au rectum alors appelé cloaque (orifice commun de l'appareil reproducteur et du tube digestif).

Les mâles possèdent un appareil copulateur les spicules la plupart du temps pourvus d'une pièce accessoire le gubernaculum qui leur sert de guide. Ces spicules possèdent une musculature qui leur permet de faire saillie à l'extérieur ; ils ont pour fonction d'ouvrir la vulve de la femelle. Les mâles de certaines espèces ont des ailes caudales ou bursae qui sont des extensions cuticulaires qui maintiennent la femelle pendant la copulation.

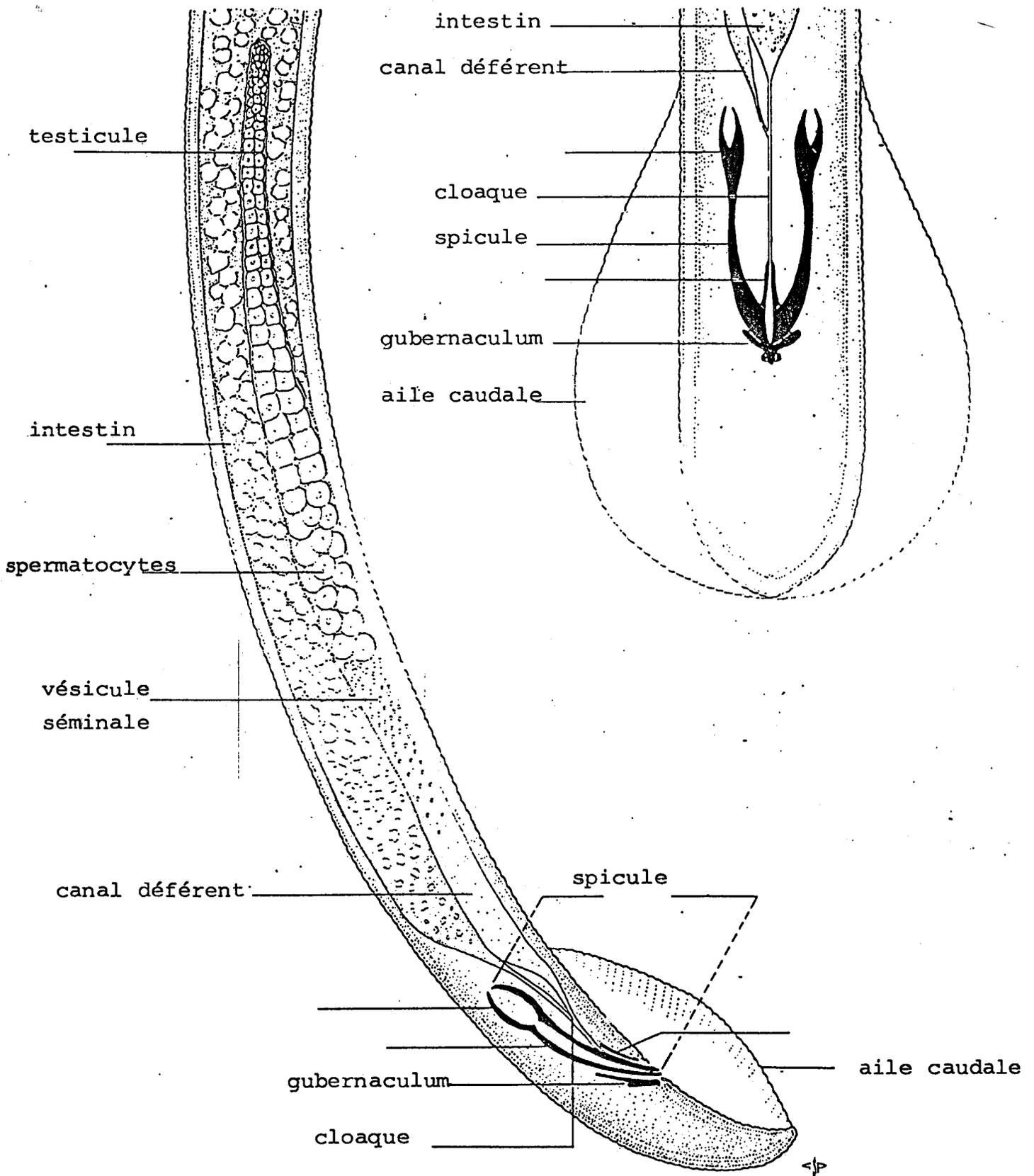


Figure 8 : Appareil génital Mâle.

(Ayoub S.M. (1977). Plant nematology. An agricultural training aid.).

Chapitre N° 3

Les bases de la classification des nématodes phytoparasites.

3.1. Introduction.

La classification d'un groupe quelconque d'animaux est un instrument créé par l'homme pour lui permettre de reconnaître et de cataloguer les différents spécimens qu'il rencontre. Une classification est donc un système artificiel qui doit non seulement permettre de reconnaître les animaux mais aussi de montrer les relations existant entre les différents animaux.

Les bases de la classification des nématodes phytoparasites reposent sur des différences de structures visibles au microscope en lumière visible. Elles reposent aussi sur des critères biologiques, biochimiques, éthologiques et écologiques. La microscopie électronique commence à être utilisée comme appoint.

3.2. Place des nématodes phytoparasites dans le règne animal.

Les nématodes sont des métazoaires protostomes à symétrie bilatérale cylindrique ou fusiforme. Ils sont revêtus d'une cuticule solide. Ils sont toujours dépourvus de cellules ciliées. Leur corps n'est pas métamérisé et présente tout au plus une annélation superficielle. Le tableau 1 résume leur position dans le monde animal.

Les nématodes phytoparasites appartiennent à trois ordres : Tylenchida, Aphelenchida et Dorylaimida. Certains nématodes appartenant à ces ordres ne sont pas phytoparasites. Le tableau 2 indique les caractères permettant de différencier ces trois ordres.

3.3. La classification des nématodes phytoparasites en familles, genres et espèces.

A l'intérieur des ordres on distingue des familles. Ces familles sont différenciées à l'aide de caractères morphologiques ; ainsi les caractères suivants sont utilisés :

Tableau 1 : Place des nématodes phytoparasites dans le règne animal.

règne	: Métazoaire	: pluricellulaires
sous règne	: Eumétazoaire	: tissus différenciés en système d'organes.
subdivision	: Protostomien	: débouché oral correspond au Blastopore. Système nerveux ventral.
super embranchement	: Pseudocoelomate	: possèdent un pseudocoelome
embranchement	: Némathelminthe	: vers ronds
classe	: Nematoda	: pas de cils vibratiles : oesophage différencié : appareil excréteur glandulaire.

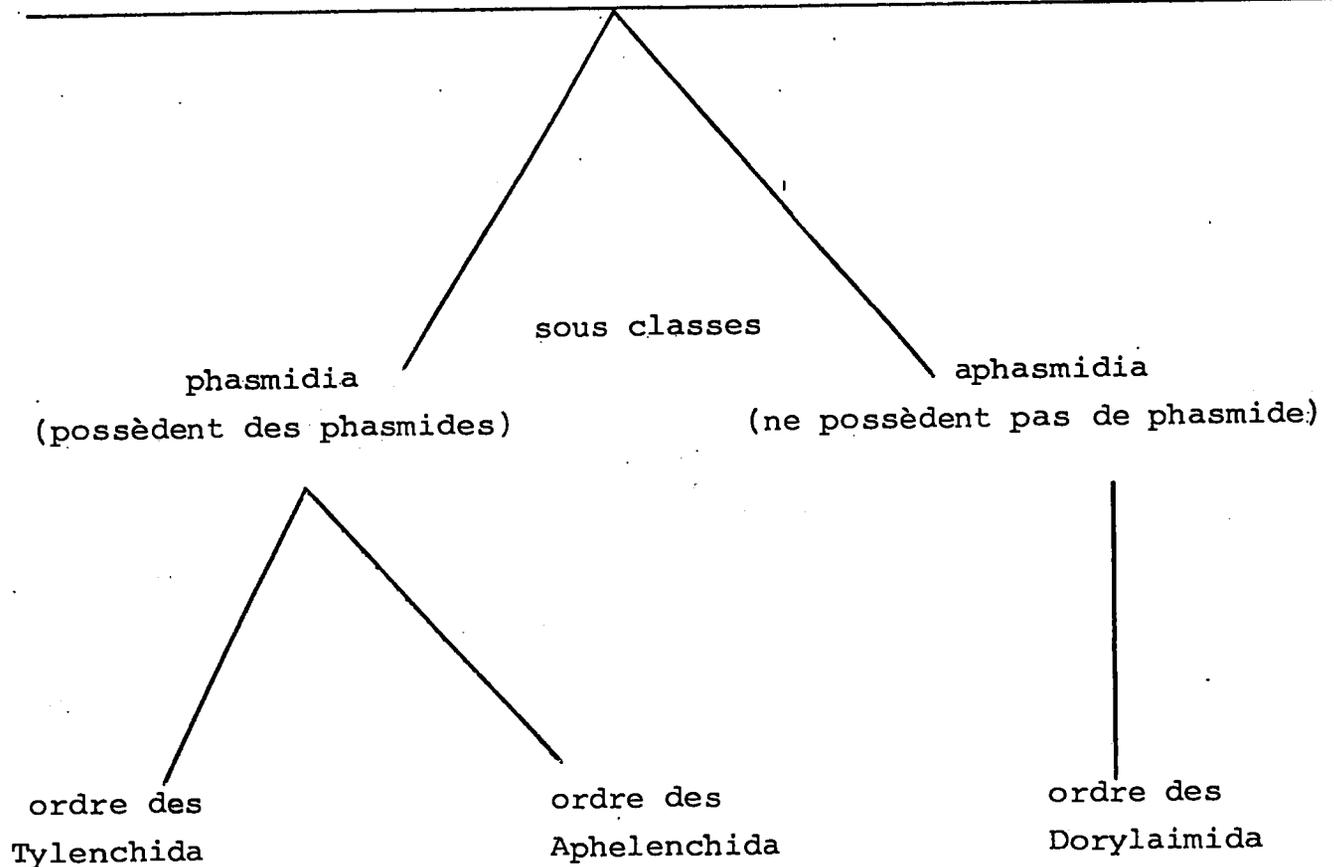


Tableau 2 : Caractères morphologiques permettant de différencier les trois ordres auxquels appartiennent les nématodes phytoparasites.

Dorylaimida	:	Tylenchida	:	Aphelenchida
- Pas de phasme	:	- Phasmides	:	- Phasmides
- Stylet sans boutons basaux.	:	- Stylet avec boutons basaux.	:	- Stylet avec boutons basaux.
	:		:	
- Généralement pas d'annelation de la cuticule.	:	- Annelation de la cuticule	:	- Annelation de la cuticule
	:		:	
- Oesophage fortement muscularisé pas de bulbe médian.	:	- Oesophage faiblement muscularisé en 3 ou 4 parties	:	- Oesophage faiblement muscularisé en 3 ou 4 parties
	:	procorpus	:	procorpus
	:	bulbe médian	:	bulbe médian
	:	isthme	:	isthme
	:	bulbe basal.	:	bulbe basal.
	:		:	
	:	- Débouché de la glande dorsale situé juste en arrière du stylet.	:	- Débouché de la glande dorsale situé à l'intérieur du bulbe médian.
	:		:	
	:	- Généralement 3 cellules glandulaires.	:	- Généralement 3 cellules glandulaires.
	:		:	

- forme de la tête de la femelle
- Stylet : forme, dimensions
- recouvrement de l'intestin par le bulbe basal
- sclérotisation céphalique : faible, moyenne ou forte
- ornementation de la cuticule : annelations, lignes du champ latéral
- forme de la femelle : fusiforme ou renflée
- nombre d'ovaires : un ou deux
- position de la vulve
- etc.....

Ces mêmes critères, permettent ensuite de déterminer le genre et finalement l'espèce.

3.3. Les principaux genres rencontrés en Afrique de l'Ouest.

Dorylaimida

<u>Trichodorus</u>)	
<u>Paratrichodorus</u>)	
<u>Longidorus</u>)	ectoparasites associés à de nombreuses
<u>Paralongidorus</u>)	cultures.
<u>Xiphinema</u>)	

Aphelenchida

Aphelenchoïdes - dont une espèce est un ectoparasite grave des tiges et des feuilles du riz.

Tylenchida

- Heterodera : endoparasite avec femelle renflée parasitant de nombreuses plantes (riz, sorgho etc.....)
- Meloidogyne : endoparasite avec femelle renflée parasitant plus de 2000 espèces végétales.
- Rotylenchulus : semi endoparasite avec femelle renflée parasitant de nombreuses cultures.
- Tylenchulus : dont une espèce est un semi endoparasite grave des Citrus.
- Hirschmanniella : nématodes endoparasites du riz irrigué.
- Pratylenchus : endoparasites de nombreuses cultures.
- Scutellonema : nématodes endoparasites s'attaquant à l'arachide, à l'igname et aux céréales.
- Radopholus : nématodes endoparasites très répandus dans les bananeraies.
- Helicotylenchus : nématodes endo ou ectoparasites de très nombreuses plantes.
- Tylenchorhynchus : ectoparasites associés à un grand nombre de cultures.

Chapitre N° 4

Techniques d'étude

4.1. Les objectifs des techniques d'étude.

On ne peut espérer percevoir et résoudre un problème nématologique en se rendant uniquement sur le terrain. En effet, l'absence de symptômes spécifiques (à l'exception de Meloidogyne) et la faible taille des nématodes rendent nécessaires le prélèvement d'échantillons sur le terrain et leur analyse ultérieure au laboratoire.

Pour les identifier et les dénombrer, les nématodes doivent être extraits du sol et du matériel végétal qu'ils parasitent.

Il importe aussi de vérifier que le nématode parasite activement la plante sur laquelle il a été trouvé : c'est le rôle des élevages. Il faut par ailleurs déterminer l'effet pathogène du nématode vis à vis de la plante qu'il parasite : c'est le rôle des études de pathogénie. (Ce dernier point fait l'objet d'un paragraphe du chapitre 8).

4.2. Le prélèvement des échantillons.

Un échantillon est constitué par une certaine quantité de terre, de l'ordre de 1 litre prélevée à proximité d'une plante et d'une certaine quantité de matériel végétal prélevé sur la même plante. Cet échantillon, dès son prélèvement est recueilli dans un sac en matière plastique, puis fermé hermétiquement par un bracelet en caoutchouc de façon à éviter le dessèchement. Lorsque la partie végétale de l'échantillon est constituée uniquement par des racines, elle peut être placée dans le même sac que la terre : le tri sera fait au moment de l'analyse. Par contre des fragments de tige, des feuilles, des graines doivent être recueillis dans un sac à part. Chaque échantillon reçoit un numéro matérialisé par un ticket (Figure 9) tiré d'un carnet à souche où sont consignées toutes les indications utiles concernant le prélèvement : lieu, date, plante, état de la culture, nature du sol, humidité, etc....

LABORATOIRE DE NEMATOLOGIE

Date :

Recolt. :

N° 15001

N° 15001

Sol. :

Plante :

Vaz :

N° 15001

Aspect :

Lieu :

N° 15001

Figure 9 : Exemple de carnet d'échantillonnage.

Suivant la finalité, on peut considérer qu'il existe trois sortes d'échantillons :

- Echantillons d'enquête faunistique : on cherche dans ce cas, dans une région limitée, à déterminer quels sont les nématodes associés à une culture donnée (par exemple riz irrigué, maïs, arachide, etc....). On ne prête alors que peu d'attention à la symptomatologie. L'essentiel est de prélever un nombre important d'échantillons répartis sur toute la surface prospectée. On se ménage ainsi la possibilité de dresser une carte de la répartition des nématodes phytoparasites associés à la culture considérée. Une bonne pratique consiste à suivre une route avec un véhicule et à s'arrêter tous les 3, 5 ou 10 kms pour réaliser un prélèvement.

- Echantillons d'enquête phytopathologique : à l'origine, l'attention de l'enquêteur est attirée par des zones de mauvaise végétation ("taches") dans un champ qui devrait en principe constituer un substrat uniforme. L'existence de ces taches de végétation implique un processus pathologique dont l'agent causal doit être recherché par des analyses. A l'échelle d'un institut de recherches agronomiques ce genre de problème est abordé en général par l'intervention d'une équipe pluridisciplinaire comprenant des pédologues, des phytopathologistes, des entomologistes, des nématologistes, etc.... Dans ce cas le nématologiste prélève des échantillons à l'extérieur des taches, à la limite des taches et à l'intérieur des taches. Après analyse, une éventuelle corrélation entre la présence des symptômes de déficience et la présence de nématodes phytoparasites en plus ou moins grand nombre peut suggérer l'implication ou l'exclusion des nématodes du processus pathologique observé. Contrairement au cas précédent, l'ensemble des échantillons sera peut être collecté sur une surface réduite.

- Echantillons de contrôle : on peut être amené, soit dans un but pratique soit dans but expérimental à injecter des substances chimiques à effet nématicide dans le sol. Il est alors nécessaire de contrôler l'efficacité de ces produits en comparant les nombres de nématodes contenus dans des échantillons provenant de zones non traitées et des échantillons provenant des zones traitées.

Il convient enfin de choisir au mieux l'époque du prélèvement. En particulier, il faut éviter en général de prélever sur la terre nue, ne portant pas de culture, au cours de l'intercampagne. En effet dans ce cas certains nématodes migrent en profondeur et peuvent même se réfugier sur des racines de plantes pérennes (arbres) qui se développent dans le sous sol. Dans d'autres cas, l'intercampagne peut être caractérisée par un dessèchement accentué du sol auquel certains nématodes opposent un état de quiescence, l'anhydrobiose, qui complique l'analyse des échantillons. Pour ces raisons, il est préférable de prélever au cours de la saison des cultures et de préférence à un stade avancé du cycle, de façon à recueillir un maximum d'animaux. En effet le temps de génération des nématodes phytoparasites étant de l'ordre d'un mois et le cycle d'une culture étant de l'ordre de 3 à 4 mois, la population sera maximale vers 2 ou 3 mois.

4.3. Extraction des nématodes d'un échantillon de terre.

Au laboratoire, l'observation directe de la terre de l'échantillon, même à l'aide d'une loupe binoculaire, ne permet pas d'observer et de compter les nématodes. Il est nécessaire au préalable d'extraire les nématodes de la terre pour pouvoir ensuite les observer in vitro. Pour cela, les nématologistes ont mis au point un certain nombre de techniques, basées essentiellement sur trois propriétés qui différencient les nématodes des impuretés qui les entourent. Il s'agit de la vitesse de sédimentation dans l'eau, de la forme et de l'activité spontanée. L'élutriation qui est utilisée dans tous les laboratoires de nématologie met en oeuvre ces trois propriétés.

La méthode complète, qui comprend trois opérations : l'élutriation proprement dite, le tamisage et le passage actif est schématisée par la Figure 10.

L'élutriation : la terre de l'échantillon est tamisée sur un tamis à maille de 4 mm de façon à mettre de côté les cailloux, les débris végétaux et les racines. Cette terre tamisée est alors homogénéisée puis on en prélève un sous échantillon de 250 ml. Le reste de l'échantillon est conservé en vue d'éventuelles analyses ultérieures

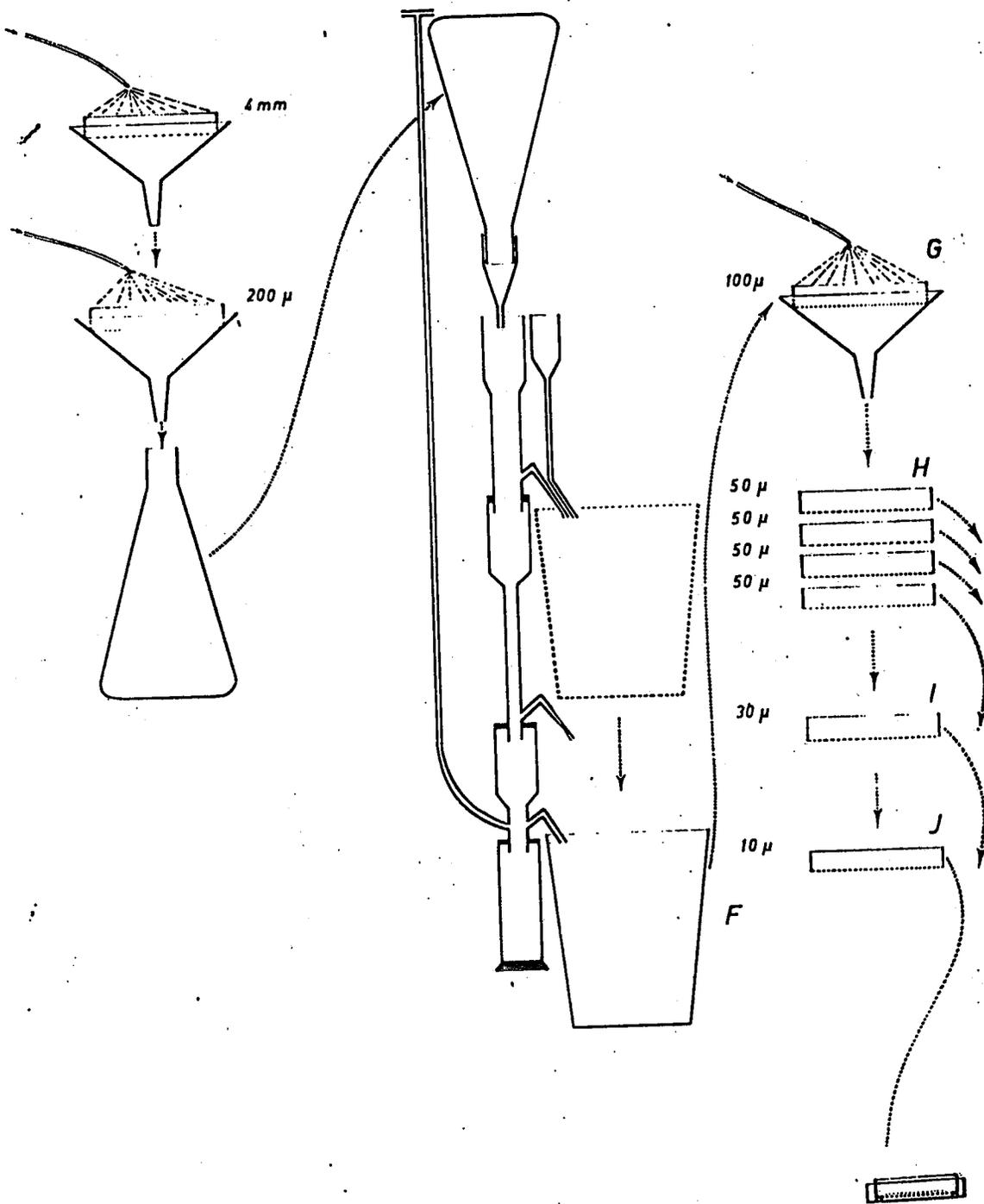


Figure 10 : Méthode d'extraction des nématodes présents dans le sol.

dans le sac en plastique hermétiquement fermé. La terre est introduite dans un erlen avec de l'eau. Ce récipient est alors renversé sur l'élutriateur (Fig. 10). Celui-ci est constitué par une colonne de verre remplie d'eau à la base de laquelle est admis un courant d'eau. Le trop plein ainsi provoqué s'écoule dans un seau par un ajustage latéral. La terre qui contient du sable, de l'argile, des débris organiques et des nématodes s'écoule alors au sein de la colonne d'eau. Le courant d'eau ascendant qui circule dans la colonne a été calculé de façon à ce qu'il laisse sédimenter les éléments lourds (sable) et qu'il entraîne vers le haut les éléments légers (nématodes mais aussi argile et débris organiques), qui sont alors recueillis dans le seau. Le tout prend environ 20 minutes.

Le tamisage : le contenu de ce seau est versé au-dessus d'une colonne constituée par 4 tamis à maille de 50 μm . Ces ouvertures laissent passer l'argile (20 μm) et ne retiennent que les nématodes d'une longueur d'environ 500 μm et les débris organiques. Il est nécessaire d'employer plusieurs tamis afin de récupérer les nématodes (d'une largeur d'environ 20 μm qui sont passés droits sur le premier tamis. Le mélange constitué par les nématodes et les débris organiques est recueilli par un lavage rapide des quatre tamis.

Le passage actif : la suspension qui contient les nématodes et les débris organiques est passée sur un tamis (à maille de 100 μm) supportant un tissu de cellulose (genre mouchoir Kleenex). Ce tissu retient les nématodes et les débris et le tamis est déposé dans une boîte en verre remplie d'eau dans laquelle il est laissé pendant 24 heures. Au cours de cette période les nématodes actifs traversent le filtre de cellulose et se retrouvent dans la boîte en verre, les débris organiques étant restés sur le filtre.

On s'est ainsi débarrassé successivement des trois impuretés qui rendaient l'observation impossible : sable, argile et débris organiques. Dans la pratique l'efficacité des trois opérations n'est pas absolue : des nématodes sont perdus lors de chacune d'entre elles. Mais en procédant de façon constante, l'erreur faite est la même pour tous les échantillons, ce qui permet de procéder à des comparaisons.

Les simplifications : elles consistent à modifier ou à supprimer la première et éventuellement la seconde opération, la troisième restant indispensable. Ceci, afin de la rendre accessible à des laboratoires qui ne disposent que d'un équipement réduit.

Ainsi au lieu de l'élutriation peut être employée la décantation qui ne réclame qu'un seau comme matériel de base. L'échantillon de terre est mélangé avec plusieurs litres d'eau dans ce seau par un vigoureux brassage à la main. Après quelques secondes de repos au cours desquelles les éléments lourds (sable) coulent au fond du seau, le surnageant qui contient les nématodes, l'argile et les débris organiques est soumis au tamisage comme dans la méthode originale.

On peut enfin ne garder que la troisième opération. Pour cela l'échantillon de terre, d'un volume beaucoup plus réduit (20 ou 50 ml) est répandu directement sur le Kleenex supporté par le tamis. Il est difficile dans ce cas d'obtenir une suspension finale propre et, à cause du volume réduit de l'échantillon, le nombre de nématodes est faible.

4.4. Extraction des nématodes d'un échantillon végétal.

Quelle que soit la nature de l'échantillon végétal à analyser (racines, graines, tiges, feuilles), ce matériel est soumis à l'asperseur à brouillard schématisé par la Fig. 11.

Ce dispositif comprend trois parties :

- une boîte à trop plein.
- un support d'échantillon constitué par de la toile à moustiquaire en plastique tendue sur un support en tube de PVC. Ce support est placé dans la boîte.
- un brumisateur intermittent. Toutes les 10 minutes pendant 30 secondes cet appareil projette un brouillard d'eau qui se dépose lentement sur l'échantillon.

Les nématodes dans les racines sont sous deux formes :

- soit une forme active (Pratylenchus, Hirschmanniella,.....) ce qui les amène à sortir de la racine et à se déplacer à sa surface.

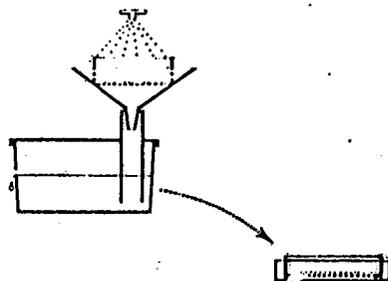


Figure 11 : Méthode d'extraction des nématodes présents dans les tissus végétaux.

- soit une forme sessile (femelles et masses d'oeufs de Meloidogyne ou de Rotylenchulus ; femelles kystes et masses d'oeufs d'Heterodera) dans ce cas ces oeufs sont externes ou internes à la racine et leur éclosion libère des juvéniles à la surface de la racine.

Le brouillard qui se dépose lentement sur l'échantillon se condense en gouttes qui entraînent ces nématodes, à travers la toile moustiquaire, vers le fond de la boîte. L'apport d'eau par le brumisateur est suffisamment faible pour que le courant de trop plein n'entraîne pas les nématodes : ceux-ci restent au fond de la boîte. Toutes les semaines le support d'échantillon est transféré dans une boîte propre et les nématodes contenus dans la boîte sont recueillis. Si la suspension obtenue est sale on procède à une purification par passage actif sur Kleenex.

On dispose pour les racines d'une autre possibilité, qui consiste à colorer différenciellement les nématodes présents dans les racines puis à les observer directement en place sous la loupe binoculaire. Pour cela on procède à une fixation dans le lactophénol bouillant qui rend transparentes les racines. Le colorant est ensuite ajouté en solution dans le lactophénol et les tissus du nématode se colorent intensément ce qui permet de les différencier des tissus végétaux qui ne prennent pas la coloration.

4.5. Identification et numération des nématodes d'un échantillon.

Une fois les nématodes extraits de la terre et de l'échantillon végétal il faut repérer la présence de nématodes phytoparasites, les identifier et les dénombrer. Pour cela on utilise la loupe binoculaire (repérage, dénombrement) et le microscope (identification au niveau spécifique). L'identification spécifique sous le microscope demande une préparation du nématode : sa fixation et son montage sur une lame d'observation ; puis il faut procéder au repérage des caractères et à la mesure des caractéristiques morphométriques des animaux.

Pour les échantillons de terre, le volume est déterminé avant l'analyse (250 ml), les nématodes recueillis sont réunis dans

50 ml d'eau et on compte soit un aliquot (5 ml) soit la totalité après sédimentation. Pour chacune des espèces présentes le nombre d'individus est ramené au litre de sol.

Pour les échantillons végétaux le poids frais du matériel est déterminé avant la mise à l'aspersion. On procède au dénombrement des animaux recueillis en 2 ou 3 semaines et ceci chaque semaine. Pour chacune des espèces, le nombre des individus présents est ramené au gramme de matériel végétal.

Pour chaque échantillon, on remplit alors une feuille d'analyse (Figure 12). L'ensemble des feuilles d'analyse remplies par un laboratoire de Nématologie représente le fond d'archives indispensable à son activité. Cela permet d'effectuer des regroupements par plante (enquête faunistique) par espèce de nématode (carte de répartition) ou de suivre dans un même endroit, l'évolution des populations.

Lors de l'examen des échantillons deux objectifs sont à considérer :

- le repérage qualitatif des genres ou espèces importants.
- l'aspect quantitatif sous deux formes : la fréquence (pourcentage des échantillons contenant une espèce donnée) et l'abondance (nombre d'individus par unité de volume de terre ou de poids de racine).

La considération de ces éléments permet une première évaluation de l'importance des problèmes.

4.6. Elevage des nématodes phytoparasites.

L'élevage des nématodes phytoparasites a deux buts :

- vérifier qu'une espèce considérée se développe bien sur la plante à laquelle elle a été trouvée associée.
- obtenir des inoculums suffisamment importants pour réaliser des expériences.

Réaliser un élevage de nématode consiste à mettre en présence une seule espèce de nématode avec une seule espèce de plante.

O. R. S. T. O. M.
 DEPARTEMENT DE NEMATOLOGIE

ECHANTILLON N°
 15628

Plante Bananier

Lieu Station Fruitière Km 15, route de Rufisque
 Cap Vert - Sénégal

Date prélèvement 6/01/1984 Date examen 8-1-84 - 15-1-84 - 22-1-84

Récolteur J.-C. PROT Déterminateur J.-C. PROT

I.S.P. 7920-73

ESPECES OBSERVEES	Sol		70...gr. Racines (Asp. Mix.)			
	N./5 cc	N./L. Sol	N...7 jrs	N14 jrs	N. total	N/gr. racines
a. Radopholus similis		1300	720	110	830	12
b. Helicotylenchus multincinctus		240	120	50	170	2
c. Helicotylenchus dihystra		600	270	90	360	5
d. Meloidogyne sp.		2800	30000	25000	55000	786
e. Criconemella sp.		20	-	-	-	-
f.						
g.						
h.						
i.						
j.						
k.						
l.						

MONTAGES :

Figure 12 : Exemple de feuille d'analyse nématologique.

Pour cela il est donc nécessaire de trier un par un les nématodes qui seront inoculés sur la plante et de faire croître cette dernière dans un pot contenant de la terre préalablement stérilisée (par autoclavage ou à l'aide d'un produit chimique) ; la stérilisation de la terre ayant pour but de détruire les nématodes qu'elle contient inévitablement.

On vérifie qu'un nématode se développe bien sur une plante donnée si la population finale du pot est nettement supérieure à la population initiale.

Chapitre N° 5

Reproduction et cycles de développement

5.1. Reproduction

5.1.1. Introduction

La reproduction est la fonction par laquelle les êtres vivants produisent d'autres êtres vivants semblables à eux-mêmes. Les animaux pluricellulaires se reproduisent selon différents modes. Tous ces types de reproduction, à l'exception du bourgeonnement se retrouvent chez les nématodes.

5.1.2. Les différents modes de reproduction

5.1.2.1. L'amphimixie : la plupart des nématodes sont bisexués cela veut dire qu'il existe pour chaque espèce des femelles et des mâles facilement reconnaissables par leurs caractères sexuels. Les espèces pour lesquelles les mâles et les femelles sont en nombres approximativement égaux se reproduisent par amphimixie. C'est la vraie reproduction sexuée au cours de laquelle il y a fusion d'un gamète mâle et d'un gamète femelle chacun possédant un stock différent d'unités chromosomiques.

5.1.2.2. L'automixie : ou autofécondation elle se rencontre chez les nématodes hermaphrodites qui produisent les deux types de gamètes (spermatozoïde et ovule).

5.1.2.3. La pseudogamie : l'ovule est activée par l'intrusion d'un spermatozoïde qui reste ensuite inactif. Il n'y a pas de fusion nucléaire.

5.1.2.4. La parthénogénèse : l'ovule se développe sans aucune intervention du spermatozoïde.

5.1.3. Cas des nématodes phytoparasites

Chez les nématodes phytoparasites, lorsque les mâles sont à peu

près aussi nombreux que les femelles, l'amphimixie est le mode de reproduction le plus fréquent. La parthénogénèse ne se rencontre généralement que chez les espèces pour lesquelles les mâles sont rares ou absents.

5.2. Les cycles de développement

5.2.1. Introduction

Le cycle de développement d'un organisme est l'histoire complète de sa vie et de ses transformations à partir d'un stade quelconque et jusqu'à la réapparition de ce stade (par exemple de l'oeuf au nouvel oeuf de la génération suivante).

Les détails des cycles de développement des nématodes phytoparasites diffèrent d'un genre à l'autre et même d'une espèce à l'autre. Ces variations sont entraînées par la multiplicité des sols, des climats et des écosystèmes dans lesquels ils vivent. Une autre cause de diversification provient des relations hôtes parasites qui varient avec chaque espèce ; certaines ne pénètrent jamais dans les plantes, d'autres se développent dans les racines, d'autres encore parasitent les parties aériennes des végétaux.

Si les cycles de développement des différentes espèces de nématodes phytoparasites varient par des détails, tous sont basés sur le même mode fondamental qui peut être schématisé comme suit :

- L'oeuf.
- Le juvénile de 1er stade qui se développe dans l'oeuf. première mue qui a lieu dans l'oeuf.
- Le juvénile de 2ème stade qui émerge de l'oeuf. deuxième mue.
- Le juvénile de 3ème stade. troisième mue.
- Le juvénile de 4ème stade. quatrième mue.

- L'adulte mâle ou femelle.

L'adulte femelle dépose les oeufs puis meurt.

Dans de nombreuses espèces à l'exception des gonades le nombre des cellules qui constituent le corps d'un nématode est prédéterminé. L'accroissement en taille, après que ce nombre soit atteint, est dû à une augmentation de la taille des cellules et non à une multiplication cellulaire.

5.2.2. Exemple de reproduction par amphimixie : le cycle de développement de Scutellonema cavenessi. (Figure 13)

Scutellonema cavenessi est un nématode phytoparasite très répandu au Sénégal ; bien adapté aux conditions climatiques sahéliennes, il résiste au dessèchement. Il parasite les cultures extensives telles que l'arachide, le mil et le sorgho en provoquant des dommages importants.

Les adultes mâles et femelles, vermiformes, survivent aux 8 mois de saison sèche, dans le sol, en état d'anhydrobiose (sous forme déshydratée). A la première pluie ils se réhydratent, sont réactivés et très rapidement l'accouplement et la copulation ont lieu. Quatre à cinq jours après la fécondation la femelle commence à déposer ses oeufs (une dizaine) dans le sol. Le développement des oeufs dure environ 15 jours. Le juvénile de 2ème stade (la première mue a lieu dans l'oeuf) émerge de l'oeuf et pénètre dans une racine d'une plante hôte arachide ou mil par exemple.

Dans la racine le juvénile de 2ème stade se déplace intra et inter-cellulairement. Il se nourrit sur les cellules et subit sa 2ème mue, 10 à 15 jours après la pénétration, pour se transformer en juvénile de 3ème stade.

Les juvéniles de 3ème stade peuvent soit rester dans les racines soit en ressortir. La 3ème mue a lieu dans les racines ou dans le sol et conduit au juvénile de 4ème stade.

Les juvéniles de 4ème stade sont en majorité (90%) trouvés dans le sol ; ils se nourrissent alors sur les cellules situées à la périphérie des racines. La quatrième mue qui donne l'adulte a lieu, dans le sol, environ 40 jours après l'infestation des racines.

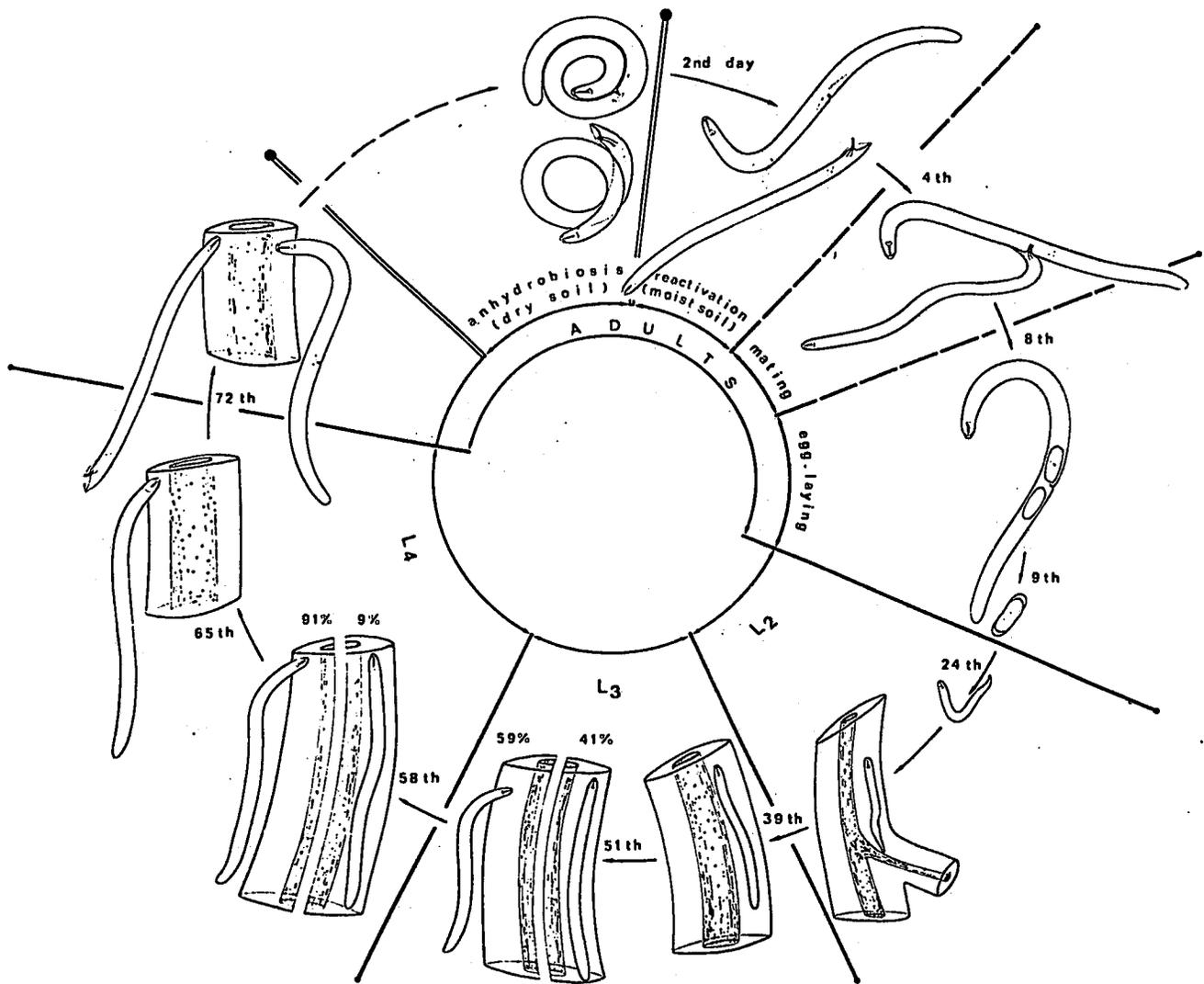


Figure 13 : Cycle de développement de Scutellonema cavense d'après Demeure, Netscher et Quénéhervé.

Revue Nématol., 3 : 213-225.

Scutellonema cavenessi se reproduit donc selon le mode amphimictique (reproduction sexuée). De l'adulte à l'adulte le cycle de développement prend au total environ 70 jours. Tous les stades ont un aspect vermiforme typique.

5.2.3. Exemple de reproduction par parthénogénèse : le cycle de développement des nématodes du genre Meloidogyne. (Figure 14)

Les nématodes du genre Meloidogyne sont peut être les plus polyphages et les plus ubiquistes des nématodes phytoparasites. Ils sont présents sous tous les climats mais prolifèrent particulièrement en climat tropical. Trois espèces principales sont présentes sous les tropiques : M. javanica, M. incognita et M. arenaria. Au Sénégal ils constituent l'un des principaux facteurs limitants la rentabilité et le développement des cultures maraîchères.

L'adulte femelle pond ses oeufs dans une substance gélatineuse formant la masse d'oeufs; cette substance est produite par des glandes débouchant dans le rectum. Le développement de l'oeuf en juvénile de 2ème stade prend 7 à 10 jours.

Le juvénile de 2ème stade qui éclot de l'oeuf est vermiforme et mesure entre 0,3 et 0,5 mm de longueur et environ 10 μ de diamètre (Figure 15). Ce juvénile se déplace dans le sol; il est attiré par une racine (ce phénomène sera étudié dans le chapitre consacré au comportement des nématodes), pénètre dans cette dernière dans la région apicale et s'y déplace à la fois intra et intercellulairement. Parvenu au voisinage du cylindre central il s'y fixe, la tête fichée dans le plérome sur les cellules duquel il se nourrit. Le juvénile induit des modifications anatomiques entraînant une déformation du tissu vasculaire provoquant la formation de cellules géantes polynucléées et une hypertrophie des cellules corticales. Ces déformations constituent les galles caractéristiques d'une attaque de Meloidogyne.

Le juvénile de 2ème stade devient alors sessile (immobile) et subit 3 mues successives qui conduisent à l'adulte mâle ou femelle.

Les mâles (Figure 15), absents ou rares lorsque les conditions sont favorables, quittent les racines et se déplacent librement dans le sol. Ils ne sont pas fonctionnels (chez les espèces tropicales) et il est probable qu'ils ne se nourrissent pas.

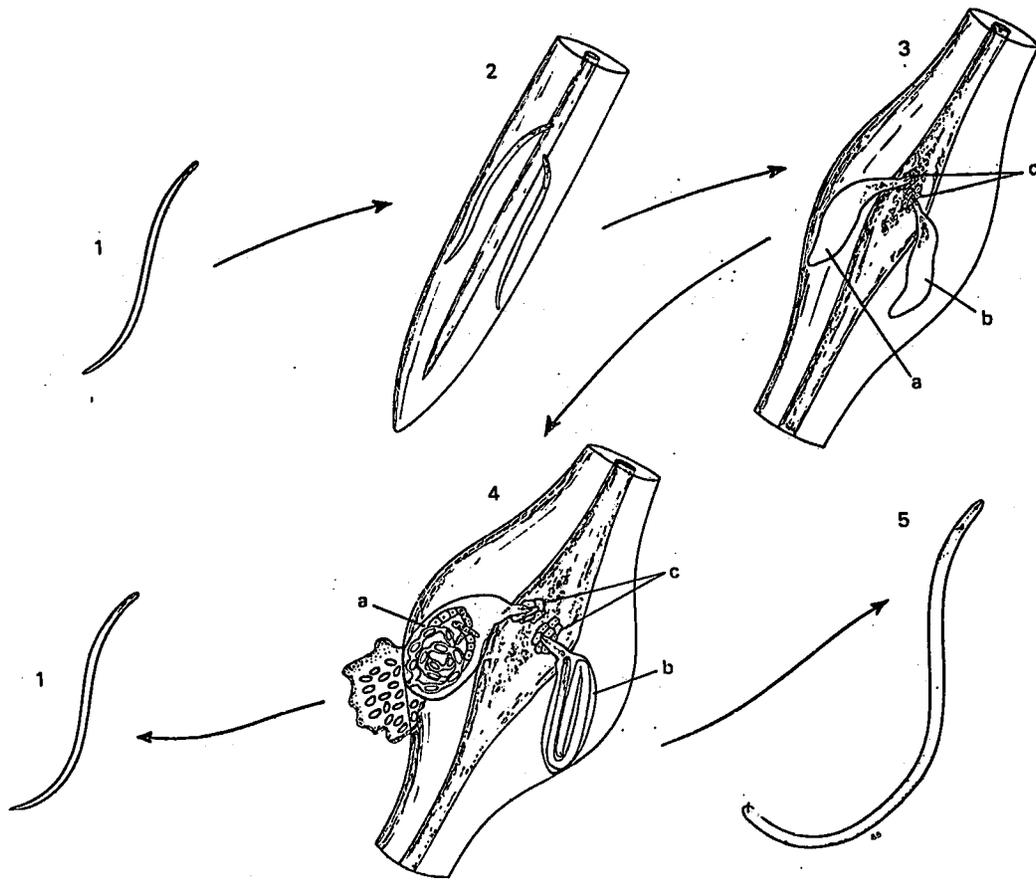


Figure 14 : Cycle des nématodes du genre Meloidogyne - 1. juvéniles de 2ème stade ; 2. juvéniles de 2ème stade ayant pénétré dans une racine ; 3. galle en début de formation; a-b : juvéniles de 2ème stade renflés ; c : cellules géantes ; 4. Galle contenant : a : femelle adulte ayant pondu ses oeufs dans la masse d'oeufs ; b : mâle inclu dans les enveloppes larvaires ; c : cellules géantes ; 5. Mâle adulte. (D'après De Guiran et Netscher Cah ORSTOM sér. Biol. 11 : 151-185).

Les femelles (Figure 15) restent en place et se nourrissent du contenu des cellules géantes situées autour de leur tête. Elles grossissent rapidement, deviennent pyriformes et mesurent 500 à 1200 μ de long et environ 300 à 600 μ de large. Elles commencent à pondre des oeufs, groupés dans la masse d'oeufs, environ 3 semaines après la pénétration dans les racines.

Le cycle des nématodes du genre Meloidogyne a donc une durée de 3 à 4 semaines. Les mâles ne sont pas fonctionnels, la fécondation n'a pas lieu. La reproduction se fait donc selon le mode parthénogénétique.

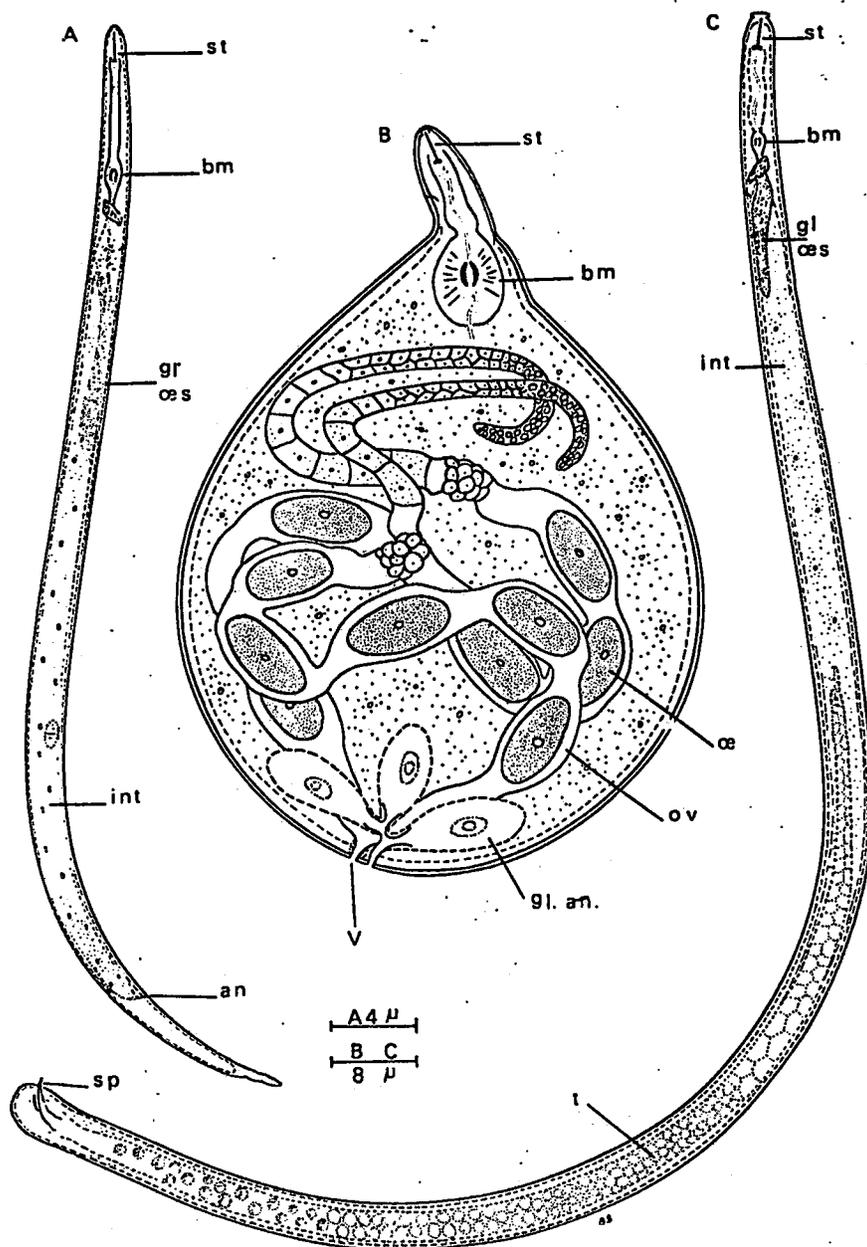


Figure 15 : *Meloidogyne* sp A : juvénile de 2ème stade. B : femelle adulte ; C : mâle adulte ; an : anus ; bm : bulbe médian ; gl.an. : glandes anales ; gl.oes. : glande basale de l'oesophage ; int. : intestin ; oe. : oeuf ; ov. : ovaire ; sp. : spicules copulateurs ; st. : stylet ; t. : testicules ; v. : vulve. (D'après De Guiran et Netscher Cah ORSTOM sér. Biol. 11 : 151-185).

Chapitre N° 6

Ecologie des nématodes phytoparasites

6.1. Introduction

L'écologie est la branche de la biologie qui étudie les relations entre les êtres vivants et les relations de ces derniers avec leur environnement.

Les nématodes sont les métazoaires les plus nombreux sur terre on les rencontre sous toutes les latitudes des pôles à l'équateur et à toutes les altitudes et profondeurs. Par ailleurs, toutes les espèces vivantes comptent au moins une espèce de nématode parmi leurs parasites ou leurs prédateurs. Les nématodes sont donc partie intégrante de tous les écosystèmes.

L'écologie des nématodes phytophages dans leur milieu naturel n'a été que peu étudiée. Ces parasites causant des dégâts importants aux cultures, les nécessités économiques ont fait que les études écologiques ont surtout porté sur les espèces économiquement les plus importantes et dans des milieux transformés par l'agriculture.

6.2. La dissémination des nématodes phytoparasites. Les migrations dans le sol.

6.2.1. La dissémination passive

Aux champs, la dispersion des nématodes est principalement consécutive à une dissémination passive. Les nématodes phytoparasites sont transportés par le vent, les eaux d'irrigation et de ruissellement, les hommes et les animaux.

6.2.2. La dissémination active

Une dispersion active de proche en proche peut être observée à la périphérie des populations initiales. Les nématodes peuvent aussi suivre les racines en croissance, ainsi, des propagations de 15 m par an ont été constatées pour Radopholus similis dans les plantations d'agrumes.

6.2.3. Les migrations dans le sol

Les nématodes se déplacent, dans le film d'eau situé à la surface des particules de sol, en effectuant une succession de mouvements sinusoïdaux. Ils peuvent se déplacer en absence de tout stimulus mais leurs déplacements sont amplifiés lorsqu'ils sont soumis à des stimuli extérieurs, la présence d'une plante hôte par exemple. Les juvéniles de Meloidogyne sont capables de parcourir 50 cm dans le sol en 9 jours pour atteindre les racines d'un plant de tomate (Figure 16).

Il a été montré que les nématodes sont attirés par des diffusions racinaires. Par exemple, les juvéniles de Meloidogyne s'accumulent dans de la terre provenant de rhizosphère de tomate mise en contact avec une terre témoin, n'ayant pas porté de plante, dans laquelle avaient été déposés les juvéniles (Figure 17).

6.3. Les facteurs influençant la répartition des nématodes phytoparasites

6.3.1. Les plantes hôtes

Les nématodes phytophages sont des parasites obligés. Cela signifie que pour survivre, compléter leur développement et se reproduire ils doivent se nourrir sur les racines ou les parties aériennes d'une plante vivante. Certains ont une gamme d'hôtes très restreinte alors que d'autres sont très polyphages.

L'établissement d'une espèce de nématode phytoparasite en un lieu donné est donc liée à celui d'un de ses hôtes.

6.3.2. Les paramètres physiques liés au climat

Il est évident que les conditions climatiques : température, précipitations, ensoleillement influencent la répartition des espèces végétales donc indirectement celle des nématodes phytoparasites. Ces facteurs ont aussi des effets directs sur ces parasites.

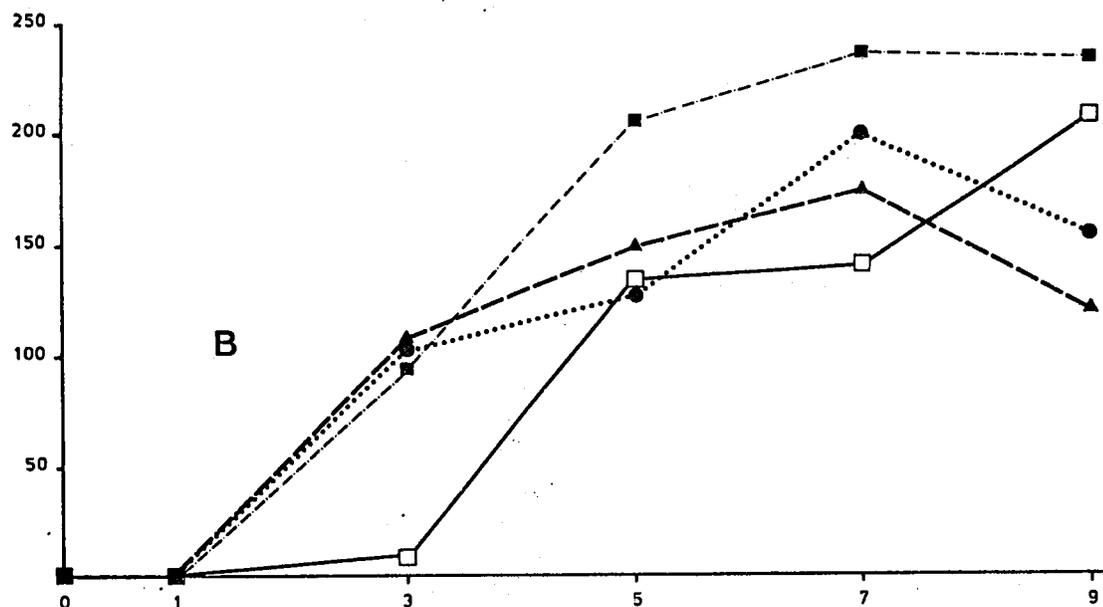
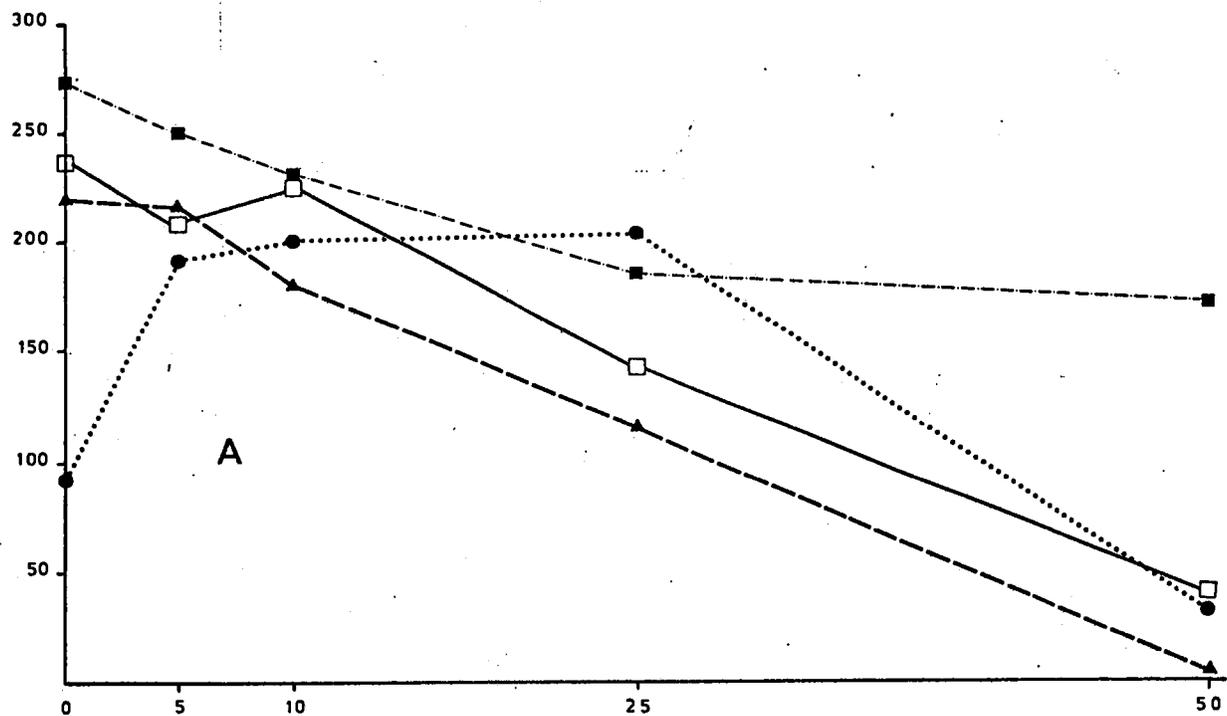


Figure 16: Migrations verticales des juvéniles de quatre populations naturelles de Meloidogyne.

A : Migration verticale en fonction de la distance (cm) entre le point de dépôt des juvéniles (300) et les racines d'un plant de tomate (abscisse) ; ordonnée : nombre de juvéniles retrouvés dans les racines 9 jours après.

B : Migration en fonction du temps, de 300 juvéniles placés à 25 cm des racines ; abscisse : durée de l'expérience en jours ; ordonnée : nombre de juvéniles retrouvés dans les racines. (D'après Prot (1978). Rev. Nématol. 1 : 109-112.

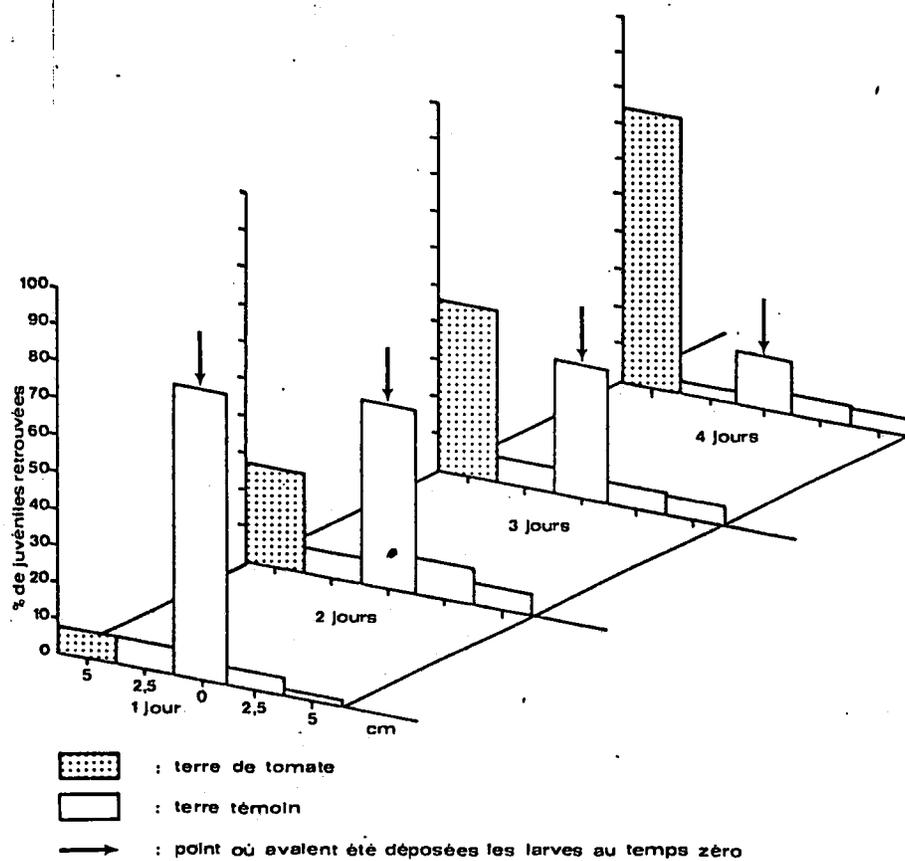


Figure 17: Accumulation dans le temps des juvéniles de Meloidogyne dans de la terre de rhizosphère de tomate.

(D'après Prot. Cah. ORSTOM, sér. Biol. X (1975)).

6.3.2.1. Influence de la température sur deux espèces de Meloidogyne

Meloidogyne incognita est une espèce fréquente sous les tropiques. Meloidogyne hapla ne se rencontre pas en zone tropicale mais est commune en zone tempérée froide.

M. incognita meurt à 0°C alors que M. hapla résiste plusieurs jours à -5°C. Il faut 2 h à 48°C pour tuer M. incognita alors que 1 heure à 45°C suffit à détruire M. hapla.

La température influence toutes les activités des nématodes : reproduction, éclosion, développement, infestation de l'hôte, mobilité etc.

Le fait que M. incognita soit adaptée aux hautes températures et ne survive pas aux basses températures alors que l'inverse est observé pour M. hapla peut expliquer la répartition en latitude de ces deux espèces.

6.3.2.2. Résistance au dessèchement de Scutellonema cavenessi et des nématodes du genre Meloidogyne

Les neuf mois de sécheresse que subit la zone sahélienne provoquent un dessèchement très poussé du sol. Les nématodes qui vivent dans ce sol doivent pour survivre résister à ce dessèchement.

En ce qui concerne Scutellonema cavenessi, à la fin de la saison sèche le sol renferme environ 50 % de la population présente neuf mois auparavant en fin de saison des pluies (Figure 18). Ce nématode résiste à la sécheresse en état d'anhydrobiose (sous forme déshydratée).

Les nématodes du genre Meloidogyne ne résistent pas à l'assèchement du sol ; moins de 1 % seulement de la population initiale est retrouvée dans le sol après les neuf mois de sécheresse (Fig. 19).

Ceci explique que Scutellonema cavenessi soit omniprésent dans les sols de la zone sahélienne sénégalaise. Par contre, les nématodes du genre Meloidogyne, très répandus et en très fortes populations

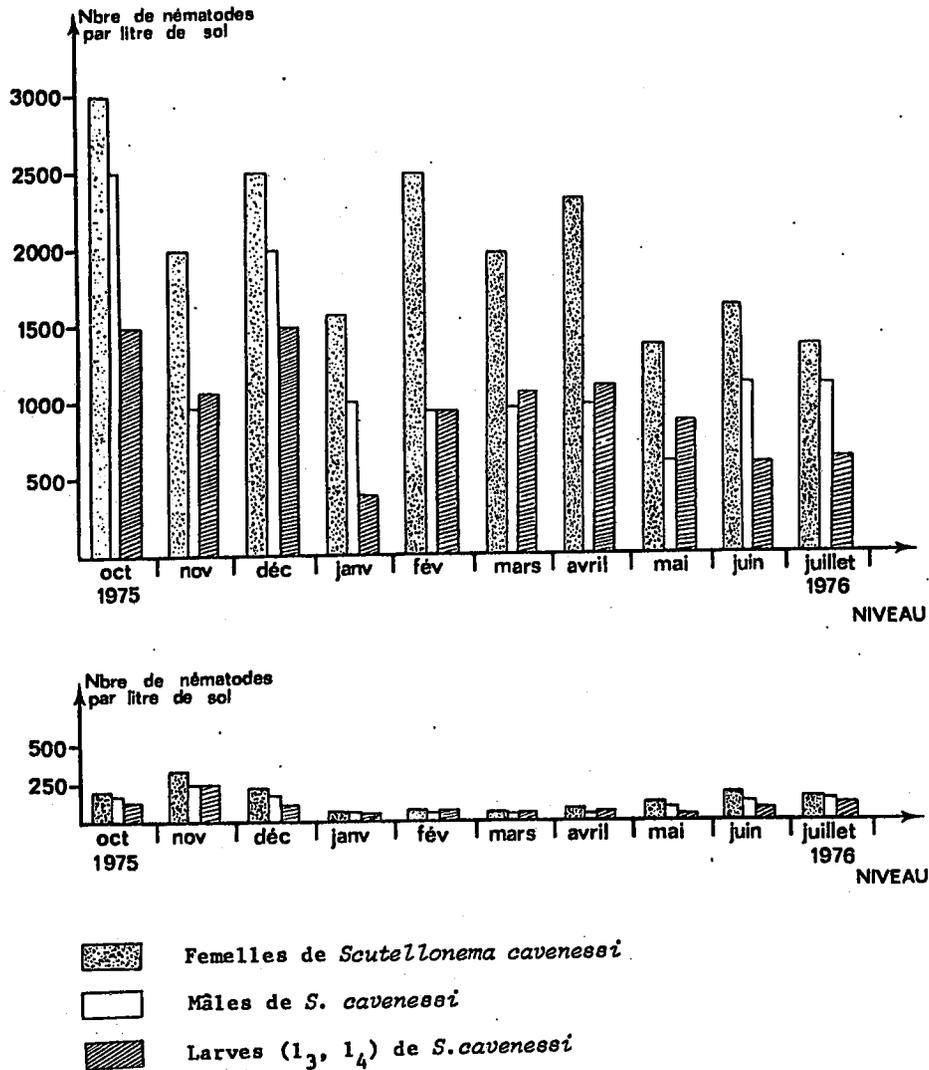


Figure 18: Evolution d'une population de *S. cavenessi* au cours de la saison sèche dans le sol aux niveaux 0-20 et 20-40 cm. (D'après Demeure (1978). Thèse de 3ème cycle Lyon 1).

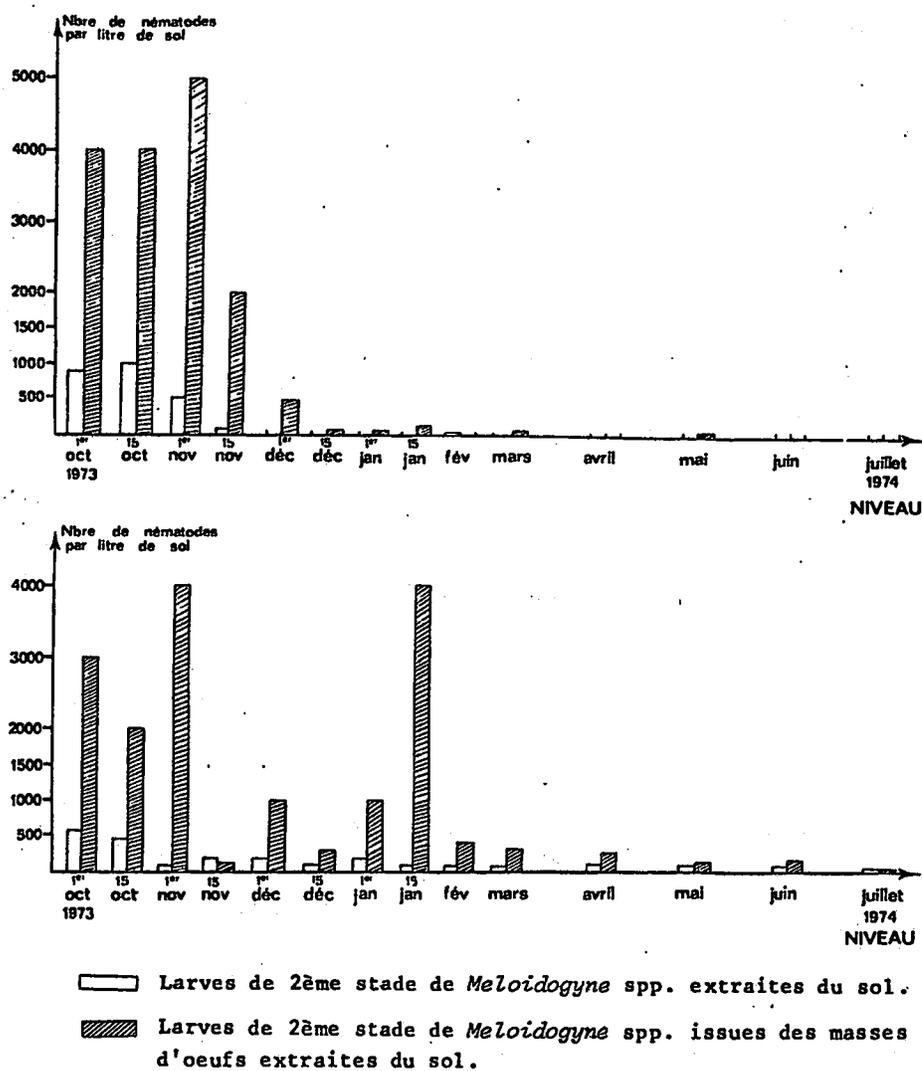


Figure 19: Evolution d'une population de Meloidogyne spp, au cours de la saison sèche dans le sol aux niveaux 0-20 cm et 20-40 cm. (D'après Demeure 1978. Thèse de 3ème cycle Lyon 1).

dans les zones de cultures irriguées ne semblent survivre dans les zones de cultures traditionnelles que dans les racines des plantes pérennes qui leur servent de refuges.

6.3.3. Les paramètres physiques et chimiques du sol

Le sol est le milieu de vie des nématodes phytoparasites. C'est un système complexe constitué d'une phase solide (minéraux et matières organiques), d'une phase liquide et d'une phase gazeuse. La texture, les composants minéraux, l'humidité, l'aération, le pH, la matière organique, la pression osmotique, les ions échangeables et le potentiel d'oxydoréduction sont les paramètres qui caractérisent un sol ils sont aussi les facteurs auxquels sont soumis les nématodes. Il est évident qu'un des facteurs de l'environnement n'intervient jamais seul mais en conjonction avec les autres.

6.3.3.1. Influence de la texture sur l'activité et la répartition des nématodes phytoparasites

La définition de la texture se réfère aux proportions relatives des particules de différentes tailles. Il est évident que la texture a une influence sur la taille des pores et sur l'épaisseur du film d'eau situé à la surface des particules dans lesquels se déplacent les nématodes. Il faut que les pores soient suffisamment larges et que le film d'eau soit ni trop épais ni trop mince pour que les nématodes puissent se mouvoir. Ainsi les juvéniles de Meloidogyne incognita sont incapables de migrer lorsque le sol contient plus de 30 % de particules fines, argiles et limons (Tableau 1). Ce phénomène peut en partie expliquer que les Meloidogyne soient généralement plus fréquents et abondants dans les sols sableux que dans les sols lourds. Ceci est vrai pour d'autres nématodes ainsi, les Longidorus et les Trichodorus ne se trouvent que dans les sols qui contiennent plus de 80 % de sable.

Tableau 3 : Migration des juvéniles de M. incognita vers des racines de tomate dans 5 différents types de sols

type de sol	% d'argiles + % de limons	% de migrations
1	14,0	31,5
2	22,1	12,6
3	25,2	9,5
4	32,7	0
5	42,0	0

(D'après Prot et Van Gundy (1981). J. Nematol. 13 : 213-217.

6.3.3.2. Effet de la submersion sur trois nématodes parasites du riz au Sénégal

Le Tableau 2 indique, pour trois nématodes parasites du riz, les populations obtenues à partir de 100 individus après 3 mois d'élevage en sol sec, avec une submersion intermittente (5 jours par semaine) ou en submersion continue. Nous constatons que les deux Hirschmanniella ne supportent pas l'absence de submersion et que par contre, T. mashhoodi, lui ne supporte pas la submersion totale mais une mise à sec de 2 jours par semaine est suffisante pour qu'il se développe. Ceci explique que T. mashhoodi soit une espèce de rizières de nappe, très humides mais non submergées (fréquentes en Casamance) et qu'on ne le retrouve pas dans les rizières submergées du Delta.

Tableau 4 : Effet de la submersion sur le développement de trois nématodes du riz

Espèces	Sol sec	Submersion intermittente	Submersion continue
<u>Hirschmanniella oryzae</u>	sol(1): 9	116	42
	racines(g): 0,15	1,73	2,2
<u>Hirschmanniella spinicaudata</u>	sol(1): 0	66	147
	racines(g): 0	4,07	1,85
<u>Tylenchorhynchus mashhoodi</u>	sol(1): 214000	53940	99

(D'après R. Fortuner (1976). Cah. ORSTOM. sér. Biol. 11 : 179-191.

Chapitre N° 7

Les relations hôte-parasite. La pathogénie

7.1. Les différents modes de parasitisme

Le mode de parasitisme a permis de subdiviser les nématodes parasites des racines en quatre grands groupes :

7.1.1. Les ectoparasites

Ils ne pénètrent jamais dans les racines. Ils se nourrissent sur les cellules se trouvant à la périphérie ou à l'apex des racines. Ils sont capables de se déplacer d'une racine à une autre. Les Tri-chodorus, les Longidorus et les Xiphinema font partie de ce groupe.

7.1.2. Les endoparasites migrateurs

Ils pénètrent dans les racines, s'y déplacent, peuvent en ressortir et changer de racine. Scutellonema cavenessi parasite de l'arachide au Sénégal en est un exemple.

7.1.3. Les semi-endoparasites

Ils se fixent en un point de la racine. Seule une partie du corps, la tête, pénètre dans la racine, le reste du corps restant à l'extérieur. C'est le cas de Rotylenchus reniformis dont le corps de la femelle se renfle ; celle-ci devenant sessile.

7.1.4. Les endoparasites sédentaires

Ils pénètrent totalement dans la racine s'y fixent et ne quittent plus le site choisi. Les Meloidogyne, les Heterodera sont des endoparasites. Chez ces deux genres le corps de la femelle devient pyriforme et parfois fait saillie à l'extérieur de la racine.

7.2. Les causes de l'effet pathogène

Les dommages causés aux plantes et les baisses de rendements qui en résultent proviennent du mode d'alimentation des nématodes.

- Ils détournent à leur profit une partie du métabolisme de la plante.
- Ils endommagent le système racinaire de la plante par réductions et destructions des racines et des radicelles ce qui réduit l'alimentation en eau et en sels minéraux.
- Ils injectent dans les cellules des sécrétions glandulaires destinées à liquéfier le contenu cellulaire avant de l'absorber. Ces sécrétions sont généralement toxiques pour les cellules et les tuent. Les Trichodorus parviennent ainsi à détruire totalement les zones de multiplication et d'élongation situées à l'apex des racines.
- Les nématodes endoparasites sécrètent généralement des substances modifiant les cellules du cylindre central et du cortex provoquant la formation de cellules géantes ; ceci au delà de la zone attaquée ce qui entraîne la formation de galles. Les cellules du cylindre central étant déformées, la circulation des sèves brutes et élaborée est fortement perturbée.
- Certains nématodes comme Scutellonema cavenessi gênent l'établissement des Rhizobium sur les racines des légumineuses privant ainsi ces plantes d'un apport substantiel d'azote.
- Les nématodes appartenant aux genres Trichodorus, Longidorus et Xiphinema peuvent être des vecteurs de virus qu'ils injectent dans la plante en même temps que leur salive.
- En s'insérant entre les cellules, en les perforant pour se déplacer et se nourrir, ils provoquent des lésions par lesquelles peuvent s'introduire d'autres agents pathogènes tels que champignons et bactéries.

7.3. Mise en évidence de l'effet pathogène

A l'exception des attaques des nématodes du genre Meloidogyne, les attaques des nématodes phytoparasites sont difficiles à reconnaître. En effet, même lorsque les dégâts subis par les plantes sont évidents aux champs, il est impossible d'en attribuer, avec certitude,

la cause aux nématodes. Ceci, parcequ'ils sont invisibles à l'oeil nu et que les dommages qu'ils causent ne sont pas caractéristiques; les plantes apparaissent chétives, chlorotiques, ont un retard de végétation, ne produisent que peu de fruits ou semble manquer d'eau. Ainsi, surtout dans les cas de culture intensive ou de monoculture, l'expression fatigue des sols a souvent masqué la véritable cause du problème : les nématodes.

7.3.1. Diagnostic d'une attaque par les nématodes du genre Meloidogyne

Les nématodes du genre Meloidogyne constituent sans aucun doute l'un des principaux facteurs limitant le développement et la rentabilité des cultures maraîchères au Sénégal et dans les pays tropicaux en général.

Ils provoquent un rabougrissement des plants et généralement un flétrissement et un jaunissement des feuilles ceci même en terrain correctement irrigué et amendé. Lorsqu'ils sont en populations importantes, ils entraînent la mort des plantes.

Il est facile de diagnostiquer une attaque de Meloidogyne car ils provoquent la formation de galles sur les racines et les tubercules ; galles qui sont caractéristiques d'une attaque par Meloidogyne. Ces galles qui peuvent être très grosses sont faciles à distinguer des nodules formés sur les racines des légumineuses par les Rhizobium. Les galles sont solidaires de la racine et situées dans son axe alors que les nodules peuvent être facilement détachés de la racine et sont en position excentrée par rapport à son axe ; les nodules bactériens se distinguent également des galles à la coupe, rosâtre dans le premier cas.

7.3.2. Mise en évidence de l'effet pathogène des nématodes phytoparasites, autres que Meloidogyne

Le fait que les nématodes sont de taille microscopique et l'absence de symptôme caractéristique rendent impossible, aux champs, le diagnostic d'une attaque par les nématodes. Dans le cas de mise en culture récente, les nématodes ne sont pas uniformément répartis dans le champ et les symptômes apparaissent par taches ayant tendance

à s'étendre d'une année à l'autre. Dans les champs cultivés depuis longtemps et surtout dans les cas de monoculture, les champs sont uniformément infestés et les symptômes sont alors difficiles à percevoir par manque de points de comparaison.

Dans le cas où une mauvaise croissance est constatée aux champs, il est nécessaire de prendre des échantillons de sol et de racines ; ces échantillons sont ramenés au laboratoire et analysés. Si une ou des espèces de nématodes phytoparasites sont présentes en populations importantes, on peut soupçonner les nématodes d'être la cause des dégâts observés aux champs mais il reste à le prouver.

La première étape de la démonstration de l'effet pathogène des nématodes est la réalisation de traitements nématicides aux champs. Si ces traitements améliorent la croissance des plantes et les rendements obtenus, on entreprend alors des expériences au laboratoire ; car il n'est toujours pas certain que les nématodes aient été responsables des dommages observés. En effet, d'autres agents pathogènes (insectes, bactéries, champignons) ont pu être détruits par le traitement nématicide.

Deux types d'expériences en pots sont réalisés au laboratoire. La première consiste à comparer la croissance des plantes sur du sol ramené du champ et autoclavé à celle obtenue sur le même sol non stérilisé. Dans la deuxième expérience les nématodes supposés pathogènes (et eux seuls) sont inoculés à des plantes croissant sur du sol stérilisé et la croissance des plantes ainsi inoculées est comparée à celle des plantes indemnes de nématodes. C'est cette dernière expérience qui nous permet de conclure avec certitude si les nématodes concernés sont pathogènes ou non et responsables ou non des dégâts observés aux champs. C'est ce schéma expérimental qui a été suivi pour mettre en évidence l'effet pathogène, au Sénégal, de Scutellonema cavenessi sur arachide, mil, sorgho et soja, de Hirschmanniella oryzae et de H. spinicaudata sur riz et de Pratylenchus sefaensis et de P. brachyurus sur maïs et soja.

Chapitre N° 8

Les méthodes de lutte.

8.1. Introduction.

La lutte contre les nématodes phytoparasites a pour but de maintenir les populations en-dessous du niveau à partir duquel ils réduisent la production agricole.

Pendant des milliers d'années ces parasites sont restés inconnus. Aujourd'hui encore, de nombreux paysans continuent de cultiver leurs champs sans prendre conscience des dégâts que causent les nématodes aux cultures. Les dommages produits par les nématodes n'ont pu être pleinement appréciés qu'après l'apparition des nématicides chimiques. Le contrôle des nématodes est devenu une partie intégrante de l'agriculture hautement développée ; il deviendra certainement de plus en plus nécessaire à un moment où la demande en produits alimentaires augmente.

Le contrôle des nématodes implique aussi bien la prévention que la lutte. Les principaux moyens de lutte sont les méthodes chimiques, les méthodes physiques (chaleur, submersion, dessèchement) et les méthodes culturales (rotations, jachère, amendements organiques, date de plantation).

8.2. La prévention.

La prévention comporte deux volets, la lutte contre la dissémination des nématodes et l'aménagement des surfaces cultivées de manière à éviter les facteurs favorisant les nématodes.

8.2.1. Prévention de la dissémination.

Il est impossible d'éviter totalement la dissémination des nématodes car ils sont transportés par le vent, les eaux de ruissellement et d'irrigation et par les animaux ; mais, cette dissémination naturelle n'a que peu d'importance en regard de celle entraînée par les activités humaines. Les nématodes sont transportés d'un endroit à un autre par les bulbes ou les jeunes plants d'arbres et de plantes ornementales ou maraîchères. Ils sont aussi transportés d'un champ à l'autre et même d'une région à une autre par

les outils agricoles souillés de terre contaminée. Avant de planter un champ non infesté il faut s'assurer que les plants utilisés ne proviennent pas d'une pépinière infestée ou qu'ils ont été débarrassés de leurs nématodes. De nombreux pays se sont dotés d'une législation qui interdit l'importation et même le transport d'une région à une autre des plants contaminés. Lorsqu'un champ est infesté, le matériel agricole (tracteurs et ustensiles aratoires) utilisé dans ce champ devrait être soigneusement nettoyé avant d'être employé dans un autre champ.

8.2.2. Aménagement et entretien des surfaces cultivées.

On évitera de conserver dans les champs des plantes pérennes susceptibles de servir de refuge aux nématodes parasites des cultures auxquelles la surface est destinée. De même, on choisira des brises vent qui ne sont pas hôtes des nématodes les plus dangereux. Un mauvais exemple, qu'aucun maraîcher ne devrait suivre sous les tropiques, est de conserver des papayers dans les surfaces consacrées aux cultures maraîchères. Le papayer est un très bon hôte pour les nématodes du genre Meloidogyne qui sont l'un des principaux facteurs limitant la rentabilité des cultures légumières. Le papayer sert de refuge à ces nématodes et aucun des moyens de luttés possibles ne sera efficace tant qu'il sera présent.

L'entretien des surfaces doit être rigoureux. Il ne sert à rien de cultiver des cultivars résistants ou des plantes pièges, dans le but de faire décroître les populations de parasites, si on ne désherbe pas correctement la culture laissant ainsi en place des plantes hôtes sur lesquelles les nématodes continueront de se multiplier. En terrain infesté il faut récupérer, autant que faire se peut, les racines parasites et les détruire par le feu.

8.3. Les moyens de lutte.

8.3.1. La lutte chimique, les nématicides et les nématostatiques.

Il n'est pas aisé de détruire, à l'aide de composés toxiques les nématodes situés dans l'eau contenue dans les pores du sol. Les produits utilisés peuvent agir soit en tuant les nématodes

(les nématicides) soit en bloquant leurs déplacements (les nématostatiques). Certains ont une toxicité directe sur les nématodes présents dans le sol. D'autres agissent comme des endothérapiques (systémiques) et protègent la plante après que cette dernière les a absorbés.

8.3.1.1. Les produits.

Les produits employés se présentent :

- soit sous forme de poudres ou de granulés qui sont incorporés au sol.
- soit sous forme de liquides se vaporisant au moins partiellement à la température ordinaire ; ce sont les fumigants.
- soit sous forme de liquides miscibles ou émulsifiables dans l'eau.

Le tableau 5 indique les principaux nématicides ou nématostatiques utilisés dans le monde avec leur utilisation, leur formulation et leur D.L. 50 pour le rat.

8.3.1.2. Les conditions de traitement.

Les produits nématicides sont généralement phytotoxiques ; il est donc nécessaire d'effectuer les traitements 3 à 4 semaines avant le semi ou la plantation. Seuls quelques nématicides peuvent être utilisés sur plantes en place ; ce sont le furadan, le mocap, l'aldicarbe et le DBCP (ce dernier seulement sur les cultures fruitières et la vigne).

Avant un traitement le sol doit être préparé comme pour une pépinière et arrosé de manière à humidifier les 60 premiers cm.

Les nématicides en granulés sont incorporés au sol. Les fumigants sont injectés dans le sol à l'aide de pals injecteurs (petites surfaces) ou à l'aide de côtres injecteurs tractés (grandes surfaces).

Afin d'éviter que les produits volatiles ne s'échappent trop rapidement du sol, il est nécessaire de reboucher convenablement

les orifices d'introduction et de maintenir le sol humide pendant au moins une semaine après le traitement.

8.3.2. Lutte physique.

8.3.2.1. La jachère nue.

Les nématodes phytoparasites sont des parasites obligés. Un bon moyen d'abaisser les taux d'infestation des sols est de le conserver nu pendant 2 à 4 mois au cours de la saison sèche pour ceux qui ne résistent pas à la dessiccation (Meloidogyne) ou au cours de la saison des pluies pour ceux qui résistent à la dessiccation dans un état anhydrobiotique.

8.3.2.2. La submersion.

Certains nématodes tels que les Meloidogyne parasitant les cultures maraîchères ne résistent pas à une submersion de plusieurs mois. L'inondation peut se réaliser naturellement (dans les Niayes) ou artificiellement dans les casiers rizicoles où peut être pratiquée une rotation riz-plantes maraîchères. Il suffit alors de désinfecter les pépinières, généralement établies en dehors de la zone inondable, afin d'éviter la réinfestation de la zone de culture.

8.3.3. Les rotations.

Le but des rotations est d'éviter ou de limiter le développement des nématodes phytoparasites afin de maintenir l'infestation en-dessous d'un seuil critique à partir duquel la rentabilité des cultures est mise en question et au-dessus duquel les traitements nématicides deviennent indispensables.

Afin d'atteindre cet objectif deux types de plantes peuvent être utilisés dans les successions culturales, les plantes pièges et les plantes résistantes.

Les plantes résistantes et les plantes pièges ne doivent être utilisées que sur des terrains peu infestés ; ceci, afin de limiter les risques d'avoir un ou des individus capables de donner naissance à une race capable de briser leur résistance. De plus on ne fera pas se succéder les cultures résistantes pour ne pas provoquer

la formation d'une souche stabilisée d'individus capables de briser la résistance.

Au Sénégal l'arachide est considérée comme une plante piège pour les Meloidogyne. L'arachide peut donc être cultivée pendant l'hivernage sur les surfaces consacrées aux cultures maraîchères pendant la saison sèche. La légumineuse Sesbania rostrata semble être résistante aux nématodes du genre Hirschmanniella qui parasitent le riz irrigué, si ce résultat se confirmait il serait alors profitable de l'introduire dans les rotations avec le riz dans le but de diminuer les populations de ces parasites.

8.3.4. La lutte biologique.

De nombreux prédateurs ou parasites (nématodes prédateurs, amibes, tardigrades, acariens, enchytréides, bactéries, champignons et insectes) attaquent les nématodes phytoparasites. Parmi ces organismes deux ont été l'objet d'une attention particulière. Bacillus semipenetrans qui tue les stades infestant ou les empêche d'avoir une reproduction normale. Les champignons, comme ceux du genre Arthrobotrys qui digèrent les nématodes après les avoir piégés dans des anneaux. Arthrobotrys commence à être utilisé comme moyen de lutte contre les nématodes dans les serres en Europe, mais la lutte biologique en plein champ en est encore au stade expérimental.

8.4. Conclusion.

Dans l'éventail des moyens de lutte dont on dispose, le traitement nématicide reste l'un des plus utilisés et l'un des plus efficaces. A l'heure actuelle on s'oriente vers un système de lutte intégrée mettant en oeuvre lorsque c'est possible, les plantes résistantes ou pièges, les méthodes de lutte physique, les pratiques culturales, la prévention ceci dans le but de diminuer le nombre des traitements nématicides qui restent onéreux, de réalisation difficile et peuvent présenter des dangers pour l'homme et son environnement.

Tableau 5 : Les principaux nématicides utilisés dans le monde.

Nom commun	Utilisation	Formulation	DL 50
<u>Hydrocarbures</u>			
<u>Halogénés :</u>			
Bromure de méthyle	toutes cultures 50 g/m ²	liquide fumigant	1000 ppm en volume dans l'air
Bromure de propylène	toutes cultures 200 l/ha	liquide fumigant	400 mg/kg
Chloropicrine	généralement mélangé au Bromure de méthyle	liquide fumigant	2000mg/m ³ d'air
Dibromure d'éthylène (EDB)	? ?	liquide fumigant	146 mg/kg
Dibromochloropropane (DBCP)	? ?	liquide fumigant	200 mg/kg
Dibromopropane (DBP)	maraichage 200 l/ha	liquide fumigant	400 mg/kg
Dichloropropane- dichloropropène (D-D)	maraichage 300 l/ha ?	liquide fumigant	140 mg/kg
Dichloropropène	maraichage 170 l/ha, cultures fruitières et viticultures 500 l/ha	liquide fumigant	250 mg/kg
<u>Produits libérant de l'isothiocyanate de méthyle</u>			
Dazomet	toutes cultures 50-70 g/m ²	granulé	640 mg/kg

<u>Carbamates et</u>	:	:	:
<u>Carbamates oxines</u>	:	:	:
Aldicarbe	: cultures florales et : ornementales et pépi- : nières des plantes : ligneuses 10 kg/ha	: granulé	: 1 mg/kg
Métam - Sodium	: cultures maraîchères : 600 kg/ha	: liquide	: 820 mg/kg
Oxyamyl	: cultures ornementales : 1 g/m ²	: granulé	: 5,4 mg/kg
Carbofuran Furadan	: maïs, sorgho, : tournesol	: granulé	: 8 mg/kg
<u>Organophosphorés</u>	: trempage des plants : dans solution à 0,25%	: liquide émulsi- : fiable	: 10 mg/kg
thionazin	:	:	:
Ethoprophos (Mocap)	: bananier, pomme de : terre, tomate 10 kg/ha:	: granulé	: 62 mg/kg
Phenamiphos (Némacur)	: bananier 70 g/pied	: granulé	: 15,3 mg/kg