

Chapitre II : Les nématodes

II.1. Généralités

- Vers rond allongés à symétrie bilatérale
- Présence d'une cuticule assez résistante.
- Les nématodes peuvent vivre dans la mer, les oueds, les océans, les sols et peuvent aussi parasiter l'homme et les animaux.
- La reconnaissance des nématodes parasites est très ancienne. Par contre, les nématodes parasites des végétaux sont récemment connus et la majorité des espèces est décrites au 20^{ème} siècle.
- Les nématodes sont de l'ordre de 500.000 espèces décrites.
- Les nématodes peuvent être bactériophages (se nourrissent de bactéries).
- Mycophages (se nourrissent de champignons).
- Saprophages (se nourrissent de matière organique).
- Prédateurs d'autres organismes du sol.
- Zooparasites (parasite ayant pour hôte un animal)
- Phytoparasites (parasite ayant pour hôte un végétal)
-

II.2. Les nématodes et l'agriculture

II.2. 1. Importance de la classe des nématodes

- Les nématodes phytopages ou anguillules sont, après les insectes un groupe des animaux les plus importants et les plus dangereux à l'égard de plusieurs plantes cultivées.
- Ils réduisent la production à environ de 11%.
- L'étude des nématodes phytopages est complexe car ces déprédateurs sont difficiles à mettre en évidence. Autrefois, les dégâts causés aux cultures, passaient souvent inaperçus ou étaient inféodés à d'autres causes : sol peu fertile ou considéré comme épuisé, humidité insuffisante... Cela s'explique en partie par le fait que ces déprédateurs sont si petits qu'il faut un microscope pour les observer.

II.2.2. Caractéristiques des nématodes parasites des plantes

II.2.2.1. Forme générale

Les nématodes phytopages sont petits, de 0,3 mm à 0,5 mm de longueur et environ 15 à 35 µm de diamètre.

- Le corps du nématode est plus ou moins transparent, et la petite taille rend difficile l'observation à l'œil nu, mais ils peuvent être observés facilement au microscope.
 - Les nématodes sont, en général, en forme de ver (vermiformes) et de section transversale ronde, avec des corps lisses et non segmentés.
 - Ils sont dépourvus de membres ou de squelette.
 - Leur corps est entouré d'une cuticule souple et continue.

- Les nématodes parasites des plantes ont une lance buccale pour pénétrer les cellules végétales.
- Les femelles de certaines espèces, gonflent à maturité et ont un corps en forme de poire ou sphéroïde

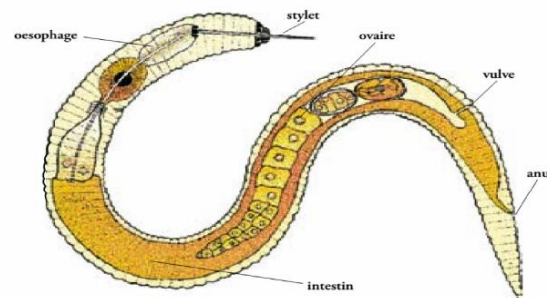
Les males ont toujours une forme élancée.

Chez d'autres espèces, il existe un **dimorphisme sexuel**, les males ont une **forme élancée et effilée**, par contre les **femelles ont une forme globuleuse**.

La bouche se trouve dans la partie antérieure du nématode.

Le pore excréteur, la vulve et l'anus s'ouvrent sur la face ventrale

La partie postérieure du corps présente une queue de pointue à l'hémisphérique selon les espèces.



Structure typique d'un nématode (d'après R. Esser).

Figure 1. Morphologie et anatomie d'un nématode phytoparasite.

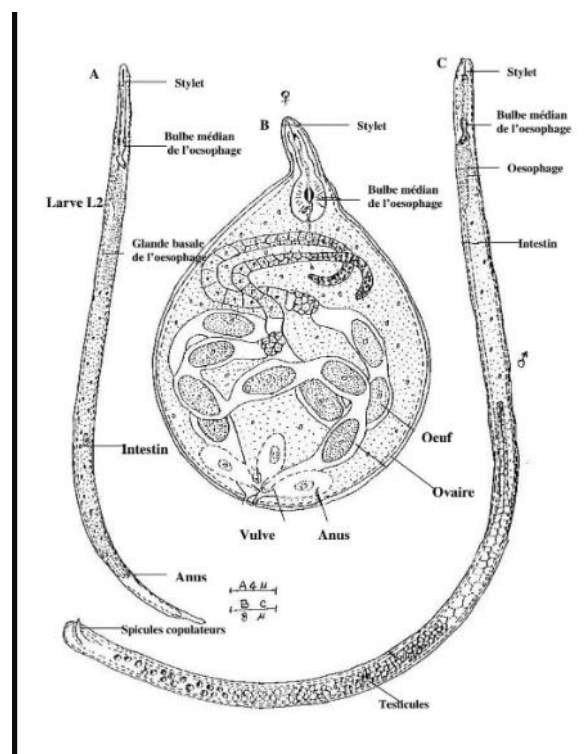


Figure 2 : Nématode phytoparasite : A : juvénile (L2), B : femelle, mâle.

II.2.2.2. Anatomie

a. Tube digestif

Il s'étend de la bouche à l'anus. Il comprend l'œsophage, l'intestin et le rectum.

- **Stylet**
 - Il a une structure cuticulaire. Son rôle principal est qu'il sert à la nourriture du nématode. Grâce à un système d'aspiration, il arrive à véhiculer les substances issues du végétal attaqué vers l'œsophage puis dans l'intestin.
- **Œsophage**
 - C'est un tube mince qui part de l'extrémité postérieure du stylet jusqu'au bulbe médian.
- **Intestin**
 - Il est formé d'une couche de cellules. C'est un organe de réserves. Il se rétrécit au rectum qui finit par l'anus.

b. Appareils reproducteurs et reproduction

- La reproduction se fait selon 3 types :
- **Bisexuée** : la femelle est fécondée par le mâle
- **Hermaphrodite** : La femelle produit à la fois des œufs et des spermatozoïdes.
- **Parthénogénétique** : Les œufs se développent sans fécondation.
- Il peut y avoir **1 à plusieurs ovaires** chez la femelle.
- Le mâle porte **1 à 2 testicules** avec les organes accessoires, 2 spicules qui permettent d'injecter le sperme dans le vagin de la femelle durant l'accouplement.

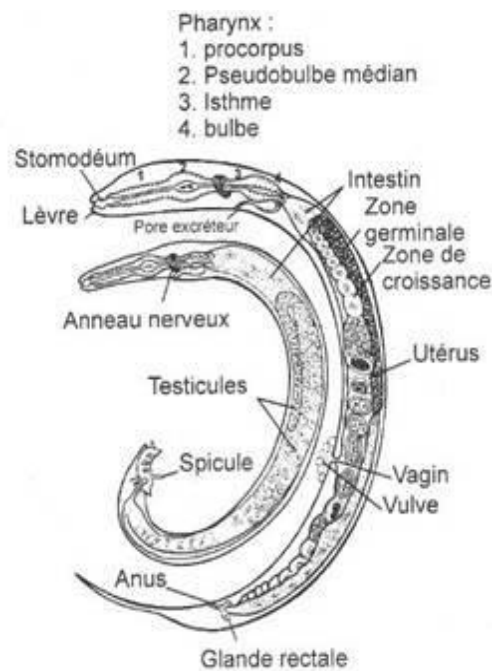


Figure 3 : Appareil génital et tube digestif d'un nématode.

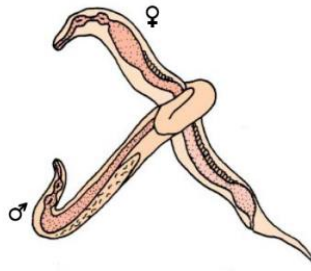


Figure 5 : Accouplement des nématodes

- c. **Système nerveux :** Il est très complexe et peu visible à l'exception d'un anneau nerveux. Ils existent des organes sensoriels (Papilles antérieures) et des organes chimiorécepteurs.

Mobilité Des Nématodes

- Les nématodes se propagent lentement dans le sol par leurs propres moyens. La distance totale parcourue par un nématode **ne dépasse probablement pas quelques mètres par saison.**
- Les nématodes se déplacent plus rapidement dans le sol lorsqu'ils sont **poreux** avec **une fine pellicule d'eau** (de quelques micromètres d'épaisseur) que lorsque le sol est gorgé d'eau.
- Les nématodes se propagent facilement par le **matériel agricole, l'irrigation, les inondations** ou les **eaux de drainage**, les **pattes d'animaux**, les **oiseaux** et les tempêtes de poussière
- Pour les longues distances, les nématodes se propagent principalement avec les **produits de la ferme et les pépinières.**

Nutrition des nématodes

- Guidé par les amphides et les organes sensoriels, les nématodes repèrent les racines se rapprochent en suivant l'odeur des exsudats racinaires pour se nourrir.
- Les papilles conduisent le nématode dans la position de prise nourriture.
- Avec le stylet, ils perforent les cellules des racines en y injectant les sécrétions salivaires qui liquéfient partiellement le contenu cellulaire.
- Le nématode peut alors aspirer par son stylet le liquide et l'envoyer vers son intestin.

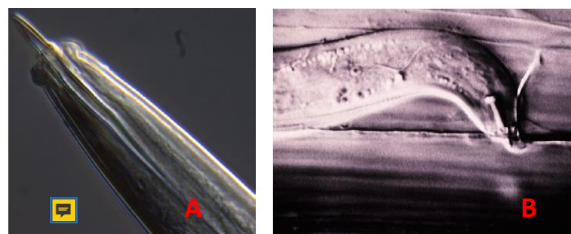


Figure 6 : Stylet des nématodes phytoparasite (A), Nématode phytoparasite piquant une cellule végétale.

Selon le mode de nutrition on distingue :

a. **Nématodes Ectoparasites :**

Ceux qui s'attaquent à l'extérieur de la plante.

- **Migrateurs**

L'attaque du végétal se fait par les adultes qui, se trouvant dans le sol, se nourrissent par le stylet grâce à des piqûres externes. Ces piqûres provoquent un arrêt de croissance des racines.

Exemple : *Xiphinema index*/ Vignoble

Criconemoides sp/ Agrumes

- **Sédentaires :**

Ce sont les femelles qui se fixent réellement par la partie antérieure à la racine en perforant les cellules épidermiques et provoquent des sécrétions salivaires entraînant un gonflement des cellules végétales avec rupture de leur parois.

Exemple : *Cacopaurus sp*/ Noyer

b. **Nématodes semi-endoparasites :**

Ils sont partiellement enfouis dans les racines pour se nourrir.

- **Migrateurs**

Ils vivent dans le sol et pénètrent dans les racines uniquement pour prélever la nourriture. Les racines ne s'allongent plus normalement.

Exemple : *Rotylenchus sp*/ Palmier

- **Sédentaires :**

Ce sont des nématodes dont leur partie antérieure s'insère dans le tissu végétal en faisant saillie la partie postérieure à l'extérieur.

Conséquences : Signes de mal nutrition- Zones de nécroses sur les racines de couleur noirâtre.

Exemple : *Tylenchulus semipenetrans*/ Agrumes

c. **Nématodes endoparasites**

Ils vivent complètement à l'intérieur des tissus de la plante.

- **Migrateurs :**

Ceux qui vivent dans les racines

Ceux qui vivent dans les bulbes et les tiges

Ceux qui s'attaquent aux racines : Pénétration des larves et des adultes à l'intérieur des racines. Ce parasite se déplace au fur et à mesure que les tissus sont détruits. Cette technique provoque des cavités qui vont être le siège d'autres maladies bactériennes et cryptogamiques.

Exemple : *Radophilus similis*/ Racines des Agrumes

Ceux qui s'attaquent aux bulbes et aux tiges : les larves et les adultes pénètrent dans les tissus.

En conséquences : Ils vidant le contenu cellulaire du aux sécrétions salivaires.

Exemples: *Ditylenchus dipsaci* / Bulbes d'oignons.

- **Sédentaires** : Pénétration des larves au stade L2 où on distingue des mâles et des femelles à ce stade.

Exemples : *Heterodera avenae*/Céréales

Globodera rostochiensis: pomme de terre

Heterodera shashitii/ Betterave-Choux-Epinards.

Meloidogyne sp/ Pomme de terre.



Figure 7 : Types de parasitisme chez les nématodes phytoparasites.

II.2.3. Symptômes dus aux attaques des nématodes phytophages

a. Partie aérienne :

- Les nématodes en s'alimentant endommagent le système racinaire de la plante par réduction des racines et destruction des racelles.
- Avec des racines plus courtes, les plantes ne peuvent avoir accès d'eau et d'éléments nutritifs. Les dommages aux racelles empêchent l'absorption normale de l'eau et des éléments nutritifs.
- Une plante infestée par les nématodes paraît souvent manquer d'eau et d'engrais par comparaison à une plante saine. Donc les symptômes sont caractérisés par:
 - une croissance réduite,
 - un flétrissement de la plante,
 - par une déformation foliaire,
 - une décoloration de la feuille
 - et une malformation de la partie aérienne.

b. Partie racinaire :

Suite à la perforation excessive des nématodes par leur stylet sur les cellules et suite à des sécrétions salivaires toxiques qui tuent les cellules, les symptômes se traduisent sous forme de plusieurs aspects :

- Nécroses superficielles qui donnent des plages brunâtres
- Déformation racinaires :
 - Racines hérissées où les racelles ne se développent plus

- racines rugueuses où seule la racine principale qui se développe,
- Bout de la racine principale courbée dus à l'attaque au niveau de l'extrémité de la racine,
- prolifération anormale des radicelles et des gales géantes

c. Symptômes dus aux interactions entre nématodes et organismes pathogènes

- Dans les cultures, les lésions des racines provoquées par les nématodes se compliquent par l'invasion immédiate des tissus par les champignons, les bactéries et les virus
- Créer des ouvertures pour l'entrée d'autres micro-organismes/interactions avec d'autres agents pathogènes

Exemples :

Xiphinema index qui donne le « court noué de la vigne » (maladie virale)

Longidorus elongatus qui transmet une maladie virale appelée « anneaux noirs » de la tomate

Meloidogyne - Fusarium

Pratylenchus - verticillium

Comment les nématodes affectent les plantes?

- Blessures mécaniques
- Changements cellulaires
- Changements physiologiques chez l'hôte
- Créer des ouvertures pour l'entrée d'autres micro-organismes
- Interaction avec d'autres agents pathogènes-transmission d'autres agents pathogènes
- Augmenter la susceptibilité au stress environnemental

Formes de conservation et de survie des nématodes

- La résistance de certaines espèces aux conditions défavorables (chaleur ou le froid) ou absence de plantes comme source de vie s'explique par le fait que les nématodes peuvent se conserver. Le mécanisme de conservation est le suivant :
- Enkystement larvaire : l'enkystement se fait à plusieurs stades L2, L3 et L4.
- Enkystement des femelles adultes
- Sac gélatineux
- Kystes rempli d'œufs.

Facteurs favorables aux nématodes

Sol

- La nature u sol influe sur le développement des nématodes. Certains préfèrent les sols légers : *Meloidogyne*, *Criconemoides*. D'autres préfèrent les sols assez lourds : *Ditylenchus*, *Hemicyclophora*.

En général les sols lourds permettent difficilement le bon déplacement des nématodes.

Température :

- La température optimale d'éclosion des larves est environ entre 10 et 13°C. Les périodes d'activité des nématodes sont différentes d'une région à une autre.
- La chaleur favorise le développement des nématodes mais ceux-ci ne résistent pas à une température supérieure à 50°C.

- A une température basse au dessous de 10°C, les nématodes sont inactifs et ne s'attaquent pas aux plantes
- **Humidité :**
- L'humidité est un facteur favorable important car il permet le déplacement et donc la dispersion des nématodes. Un début de printemps humide est en principe favorable au Nématode *Heterodera*. C'est pour cette raison que les dégâts se manifestent en printemps.
- **Plantes-hôtes :**
- Ils constituent le facteur le plus important de l'évolution des populations présentes dans le sol. Les nématodes ne peuvent se reproduire que si les plantes sont présentes pour y puiser la nourriture. Exemple : *Meloidogyne incognita* a une liste très diverse de plantes-hôtes. Il peut se reproduire sur une centaine de plantes. Par contre d'autres espèces du même genre ne peuvent se reproduire que sur quelques espèces de plantes hôtes. Ceci s'explique par le phénomène de résistance des plantes et leur sensibilité aux nématodes.

II.2.4. Classification détaillée des nématodes phytophages

Tableau 1 : Classification des nématodes phytoparasites

Classes	Sous classes	Nématodes phytoparasites
Secernentea	Rhabtidia Spiruria Tylenchia Diplogasteria	Tylenchia Diplogasteria
Adenophorea	Enoplia Chromadoria	Enoplia

II.2.5. Nématodes ayant une importance économique

Tableau 1 : Nématodes phytoparasites ayant une importance économique

Nématode	Distribution
Nématode à galles <i>Meloidogynes</i>	mondial
Nématodes à kystes : <i>Heterodera</i> , <i>Globodera</i>	Tempéré/ sub-tropical
Nématode des tiges et des bulbes : <i>Ditylenchus</i>	Tempéré
Nématode de feuilles <i>Aphelenchoides</i>	Tempéré
Nématode des lésions racinaires <i>Pratylenchus</i>	mondial
Nématode foreur de racines <i>Radopholus</i>	Sub-tropical
Nématodes transmetteurs de virus <i>Xipohinema</i> , <i>Longidorus</i> , <i>Pralongidorus</i> , <i>Trichodorus</i>	Tempéré, sub-tropical

II.2.4. Cycle biologique

- Le cycle biologique est en général très simple. Il comprend 5 stades distincts séparés par des mues,
- Dans la plupart des cas, la première mue se déroule à l'intérieur de l'œuf.
- La larve du deuxième stade est généralement la plus infestante.

II.2.4.1. Nématodes du système racinaire : Cas du nématode à gales « *Meloidogyne* »

- Dans le sol, **les œufs sont** enveloppés dans **un sac gélatineux**.
- Le froid d'hiver suivi des températures élevées du printemps font **lever la dormance** et provoquent **l'éclosion des œufs**.
- Les larves qui émergent du sac envahissent les racines de la plante.
- Il se forme **une gale** où la larve grossit et vit en parasite.
- Les larves du **3^{ème} et du 4^{ème} stade ne portent pas de stylet** et se distinguent par le **nombre de cuticules formées** en fin du développement.
- Le mâle enfermé dans la cuticule du 4^{ème} stade larvaire est libéré.
- La femelle mature devient pyriforme et pond 50 à 120 œufs.
- Ces larves vont atteindre le stade adulte soit en mâle soit en femelle à partir de la quatrième mue
- Les mâles quittent les racines et retournent dans le sol alors que **les femelles restent fixées et prennent un aspect globuleux**, elles se nourrissent et pondent à l'extérieur des racines 1000 à 2000 œufs dans **une masse gélatineuse**.

II.2.4.2. Nématode du système racinaire : Nématode à kystes du genre *Heterodera*

- Le genre *Heterodera* est caractérisé par la formation des kystes.
- Ces kystes qui se trouvent dans le sol peuvent contenir un grand nombre d'œufs.
- **La première mue s'effectue à l'intérieur de l'œuf** puis il y a éclosion des **larves du deuxième stade larvaire**.
- Lorsque les conditions du milieu sont favorables, les larves 2 glissent entre les particules du sol et les gouttelettes d'eau en **atteignant la racine de la plante dans laquelle elle pénètre au niveau des poils absorbants**.
- Elles se fixent la tête dirigée vers la partie aérienne du végétal et la queue vers l'extrémité de la radicelle. Elle vit en **endoparasite**.
- Après les L2 **grossissent et suivent progressivement leur développement**.
- Après la quatrième mue, les individus atteignent le stade adulte.
- **La femelle reste immobile** et sera fécondé par le mâle. Cette dernière meurt en **transformant sa cuticule en une enveloppe très dure** appelée « **kyste** » qui renferme un nombre d'œufs variant entre 200 à 900 œufs suivant la dimension du corps de la femelle.
- La durée du cycle s'effectue en 2 à 3 mois selon les régions. Dans les pays nordiques on en trouve qu'une génération par an.

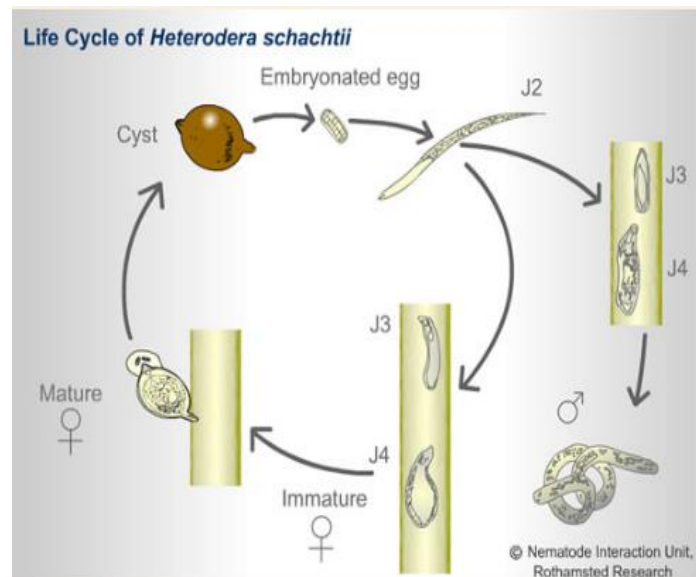


Figure 8 : Cycle biologique du nématode à kystes des céréales

II.2.4.3. Nématodes du système aérien :

Exemple genre *Ditylenchus*

- Le nématode **vit essentiellement dans les tiges** et les feuilles, Son développement et sa multiplication se déroulent **dans les espaces intercellulaires des parenchymes**.
- Le cycle peut se réaliser en 3 semaines environ à 15°C.
- La reproduction est sexuée.
- La femelle pond plusieurs centaines d'œufs dans la plante (200 à 500 œuf) , la première mue s'effectue dans l'œuf.
- Après la ponte il faut 5 jours à 15°C pour que la larve L2 éclore.
- Les L2 suivent leur développement pendant 9 à 11 jours jusqu'au stade adulte ayant un corps allongé.