

MODULE: BIO ÉCOLOGIE ET BIOSYSTÉMATIQUE DES NÉMATODES

**Présenté par
Dr SAADI Ines**

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 œsophage 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.

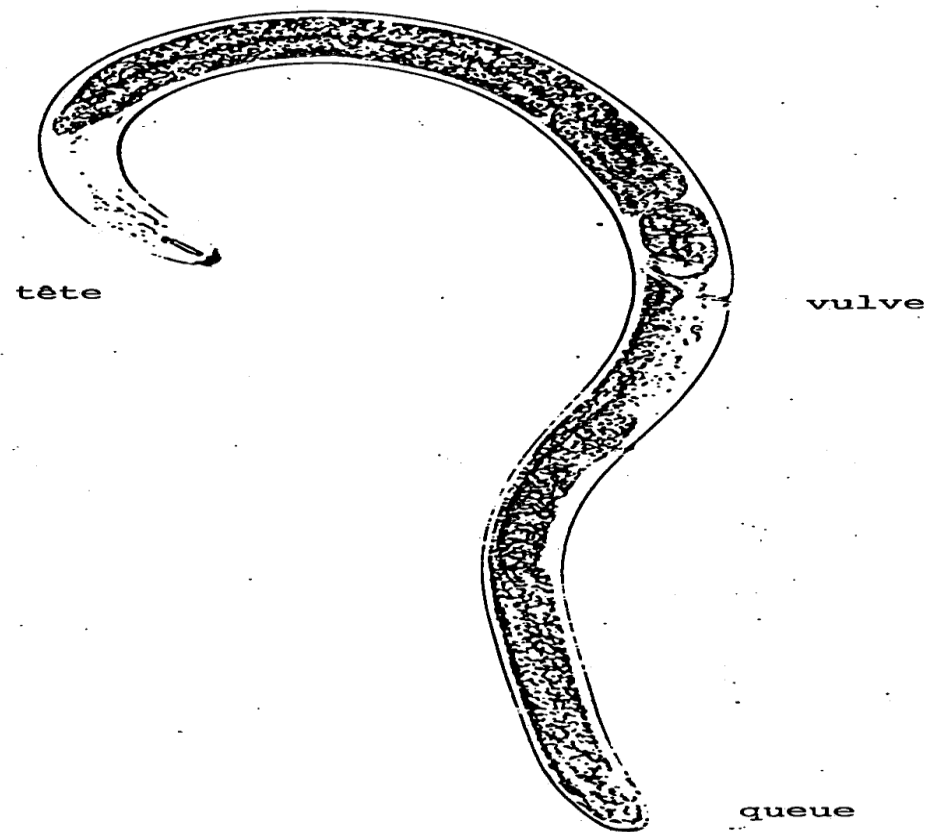


Figure 1 : Femelle du nématode Scutellonema cavenessi.
(Demeure, Y., Netscher C., & Quénéhervé, P.
(1980). Revue Nématol. 3 ; 213-226.

2. Classification des nématodes

Le phylum des nématodes est l'un des plus grands du règne animal.

En effet , aujourd'hui environ 27 000 espèces sont décrites à ce jour.

Règne : Animal

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

Source : Adoutte et al. 1999

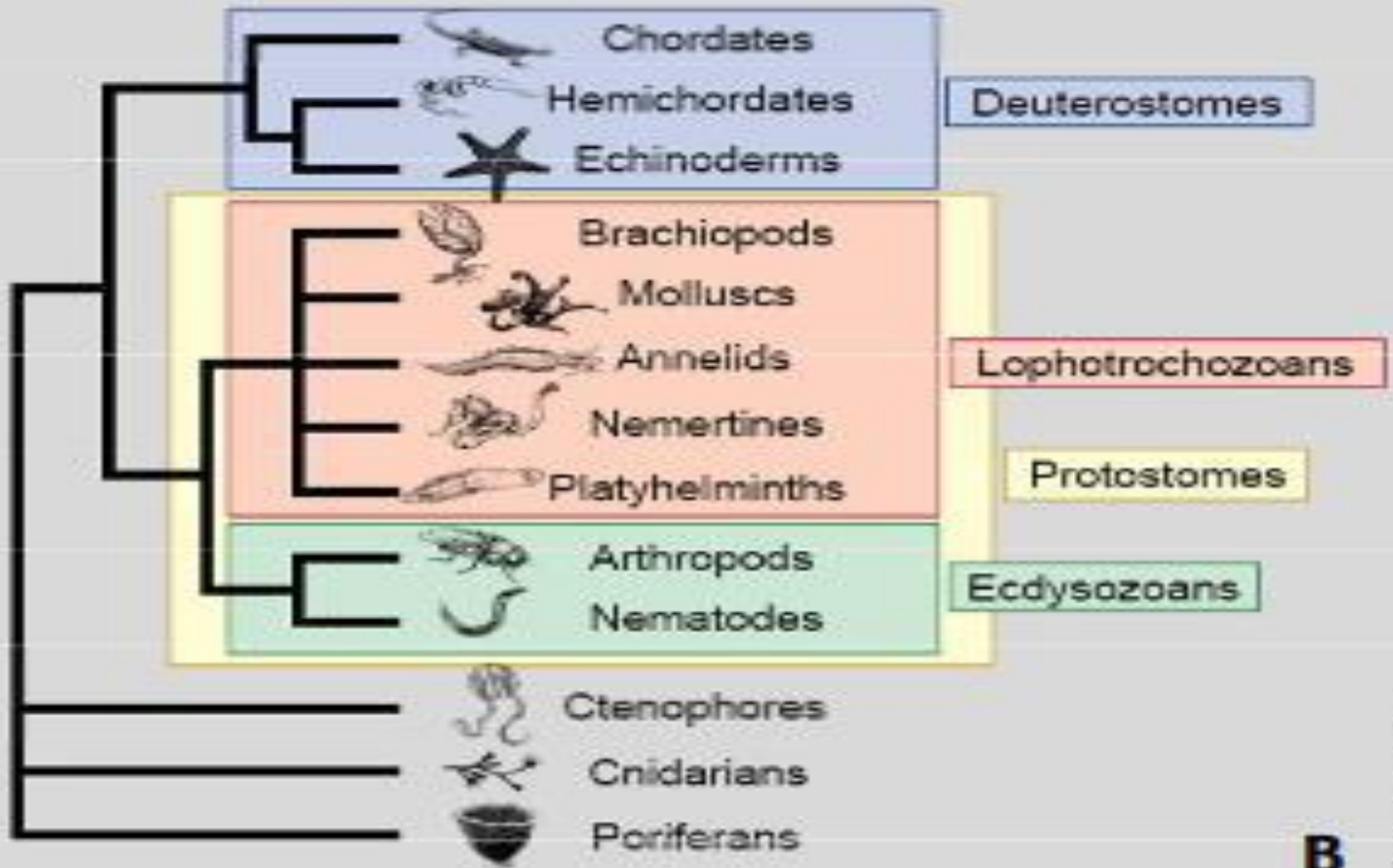


Figure 2: Phylogénie des métazoaires basée sur les séquences 18S de l'ARN ribosomal

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

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

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

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

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

3. Description morphologique des nématodes phytopathogènes.

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

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

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

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

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

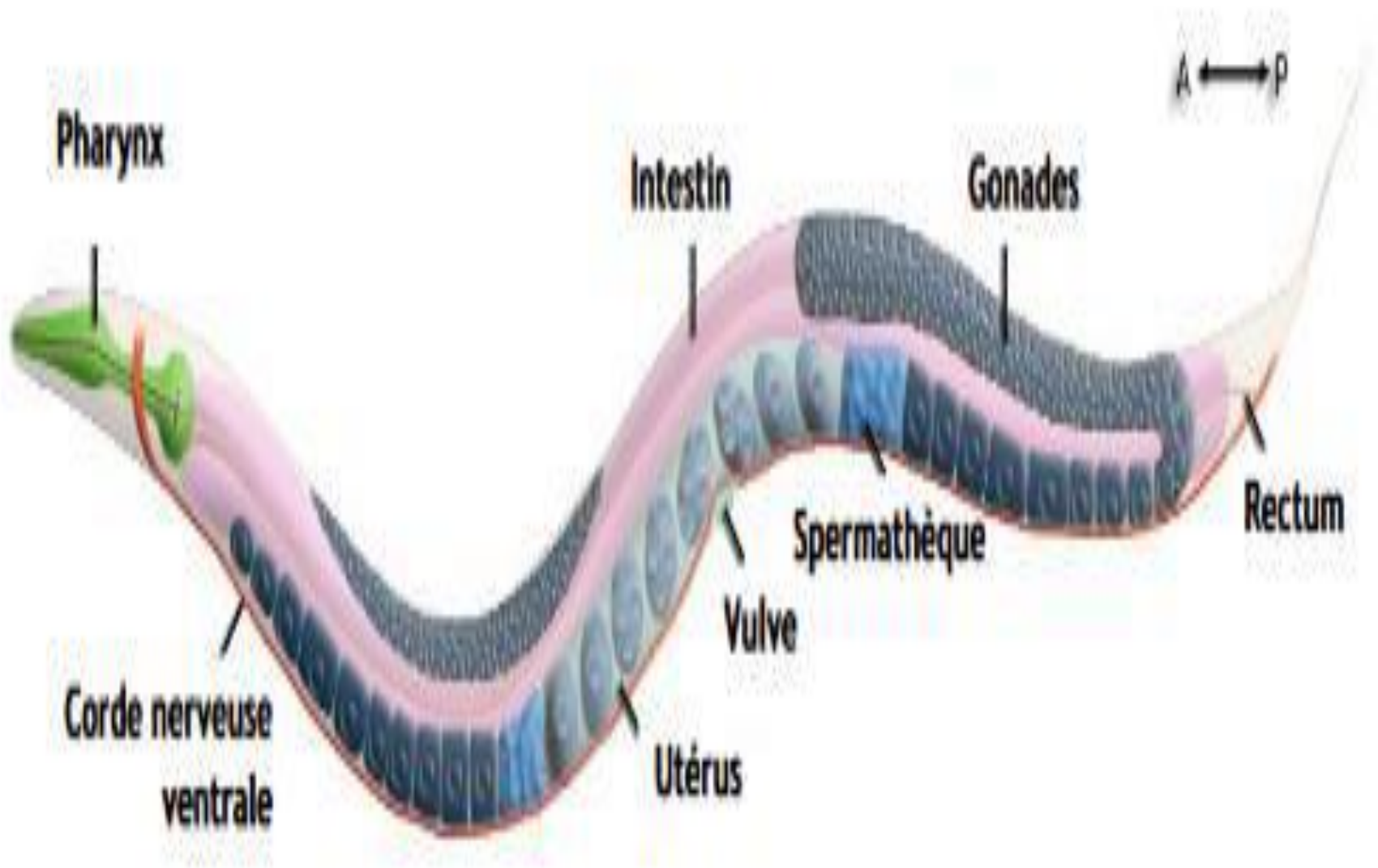


Figure 3: Anatomie générale d'un nématode

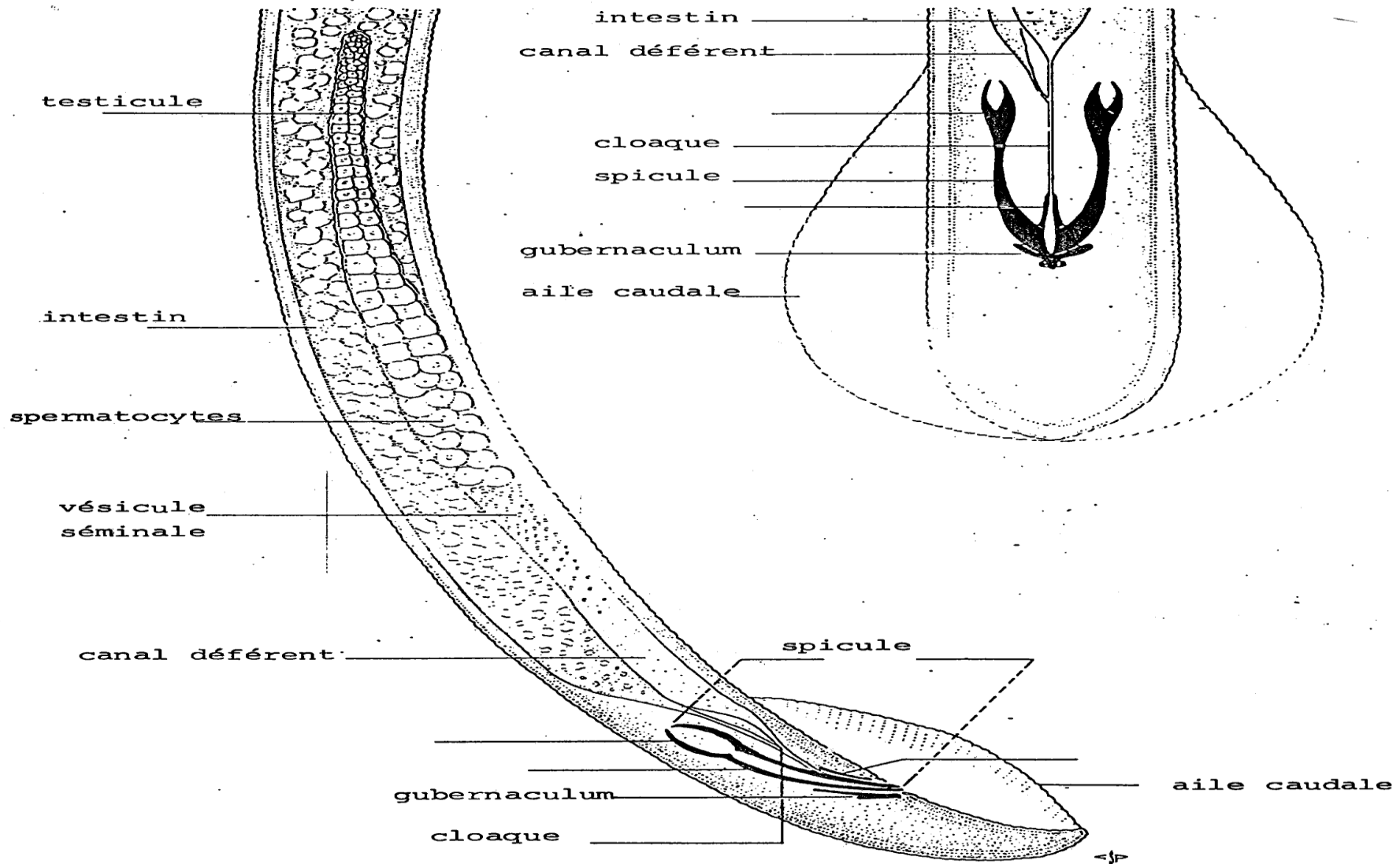


Figure 8 : Appareil génital Mâle.

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

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

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

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

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

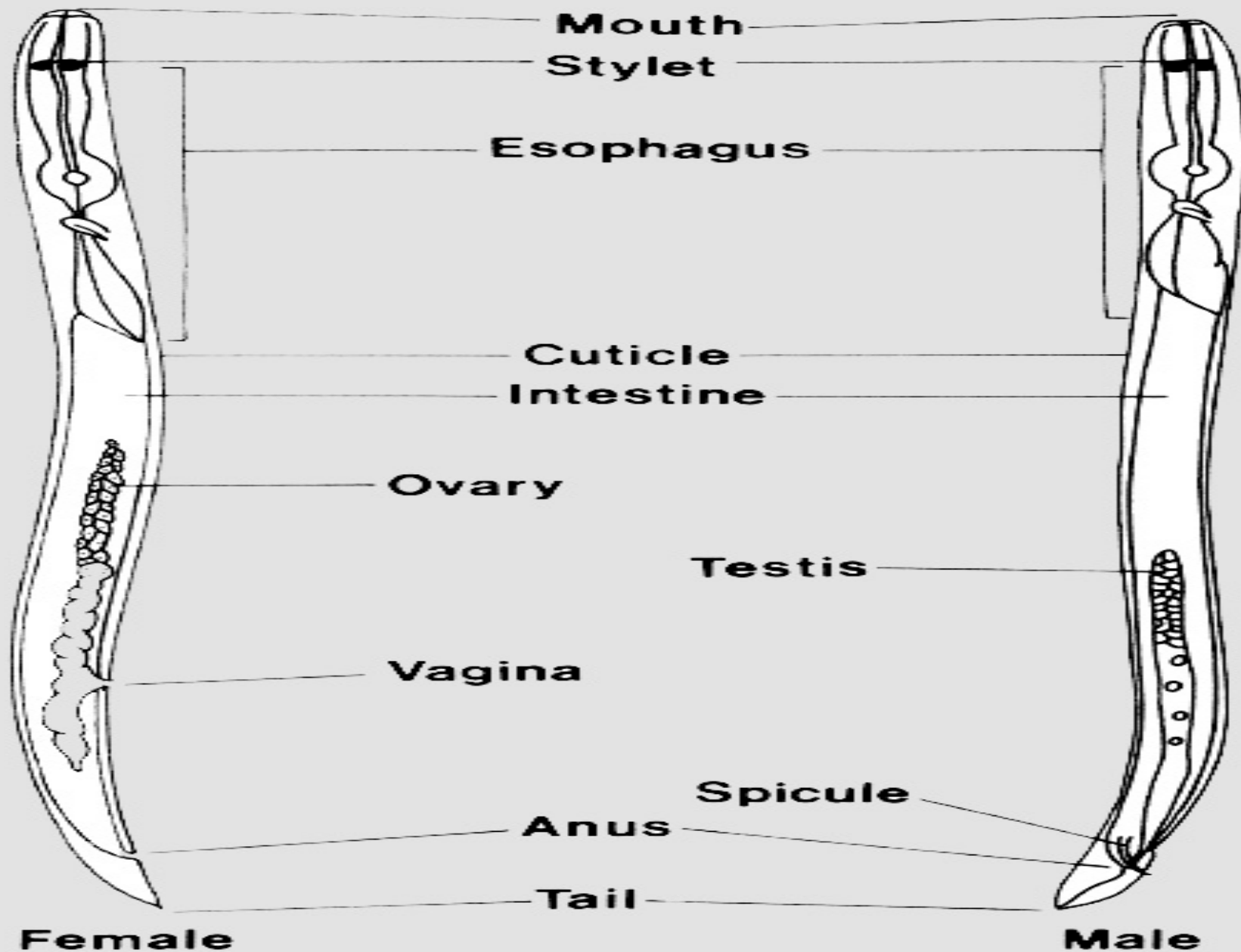


Figure 3: Schéma de comparatif de nématodes phytopathogènes, femelle et mâle.

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

4. Modes de reproduction chez les nématodes phytoparasites

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

- La reproduction amphimictique: mode de reproduction sexuée qui implique la fusion d'un gamète mâle et d'un gamète femelle haploïde.
- La reproduction parthénogénétique : mode de reproduction asexuée, qui ne nécessite pas l'intervention des spermatozoïdes du mâle (pas de fécondation). Il existe 2 types de parthénogenèse :
- La parthénogenèse méiotique où la descendance n'est pas génétiquement identique à la mère (recombinaison après méiose)

- La parthénogénèse mitotique où tous les descendants sont génétiquement identiques à leur mère (reproduction clonale).
- L'hermaphrodisme : cas particulier de la reproduction bisexuelle. Un nématode hermaphrodite est auto-fertile, il produit des spermatozoïdes et des ovules en une seule gonade. Les spermatozoïdes sont d'abord produits et stockés pour fertiliser les gamètes qui sont produits par la suite

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

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

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

Figure 5: Exemples de durée du cycle de vie, de fécondité et de modes de reproduction chez quelques espèces de nématodes phytoparasites.

5. Relation des nématodes phytopathogènes avec le milieu.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Cycle de vie des nématodes à galles, endoparasites sédentaires

Phase exophyte :

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

Une larve de stade L2 va donc être libérée.

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

Elle est attirée vers les racines par chimiotactisme

Phase endophyte

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

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

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

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

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

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

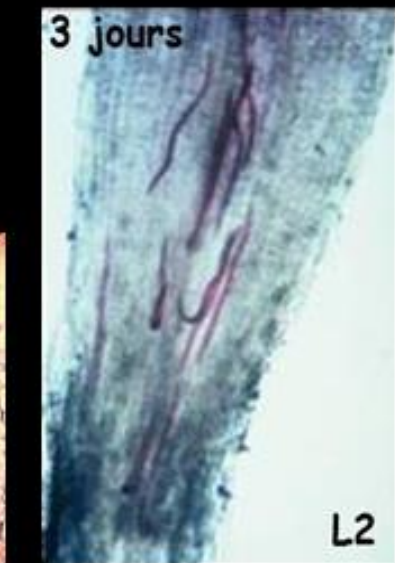
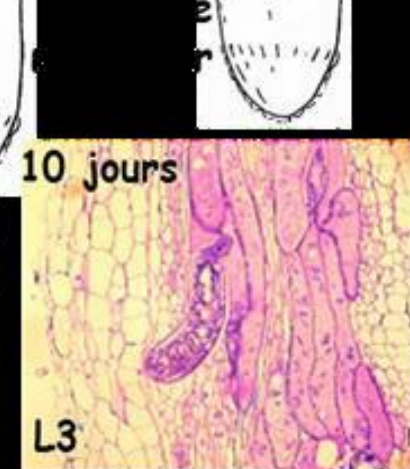
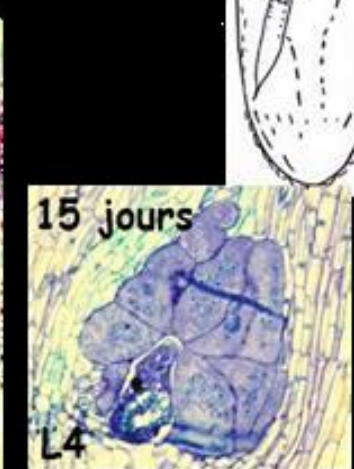
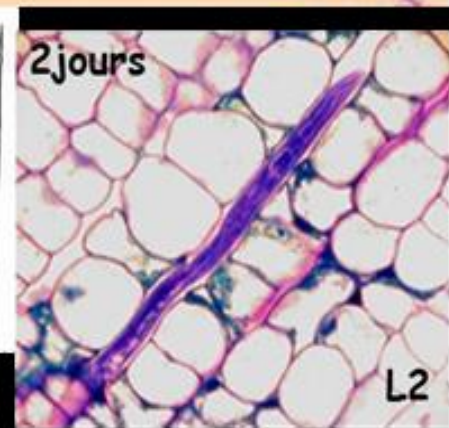
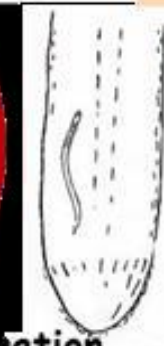
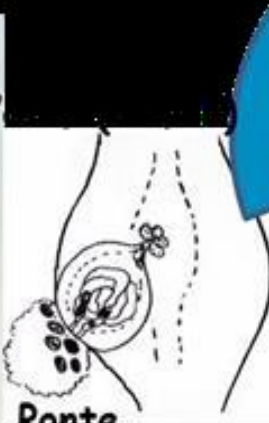
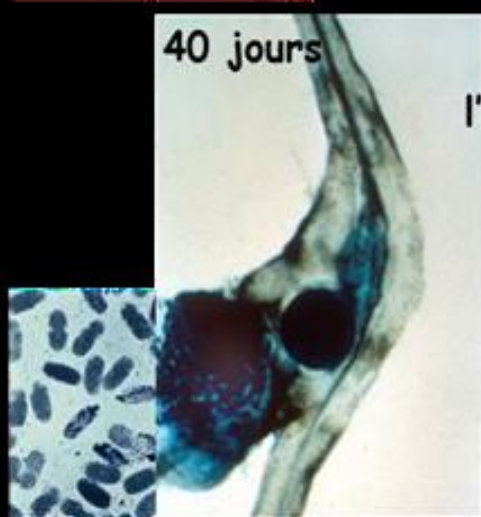
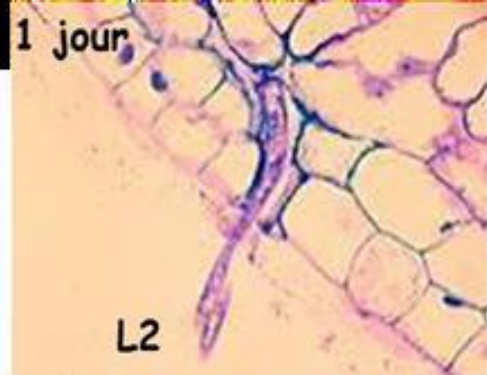
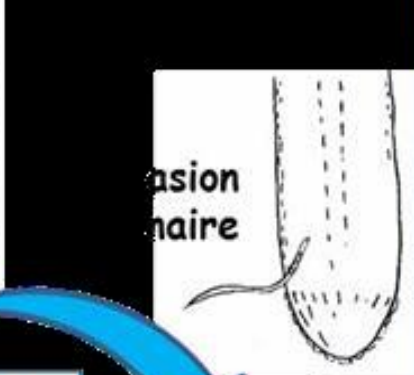
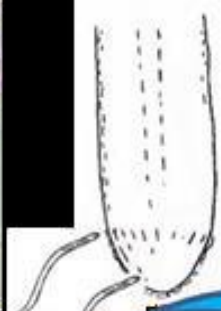
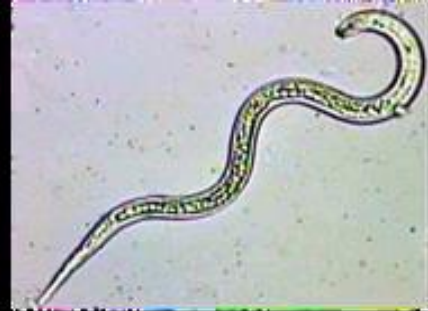
C'est à ce stade qu'elle perd son stylet (cas des endoparasites sédentaires), le nématode se différencie sexuellement et atteint l'âge adulte

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

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

Enfin elles meurent et les cellules géantes dégènèrent.

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



Cycle de vie des nématodes à kystes, endoparasites sédentaires

- *Phase Exophyte* :

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

Une larve de stade L2 va donc être libérée.

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

Elle est attirée vers les racines par **chimiotactisme**.

Phase Endophyte :

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

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

Il forme alors un syncytium avec les cellules voisines.

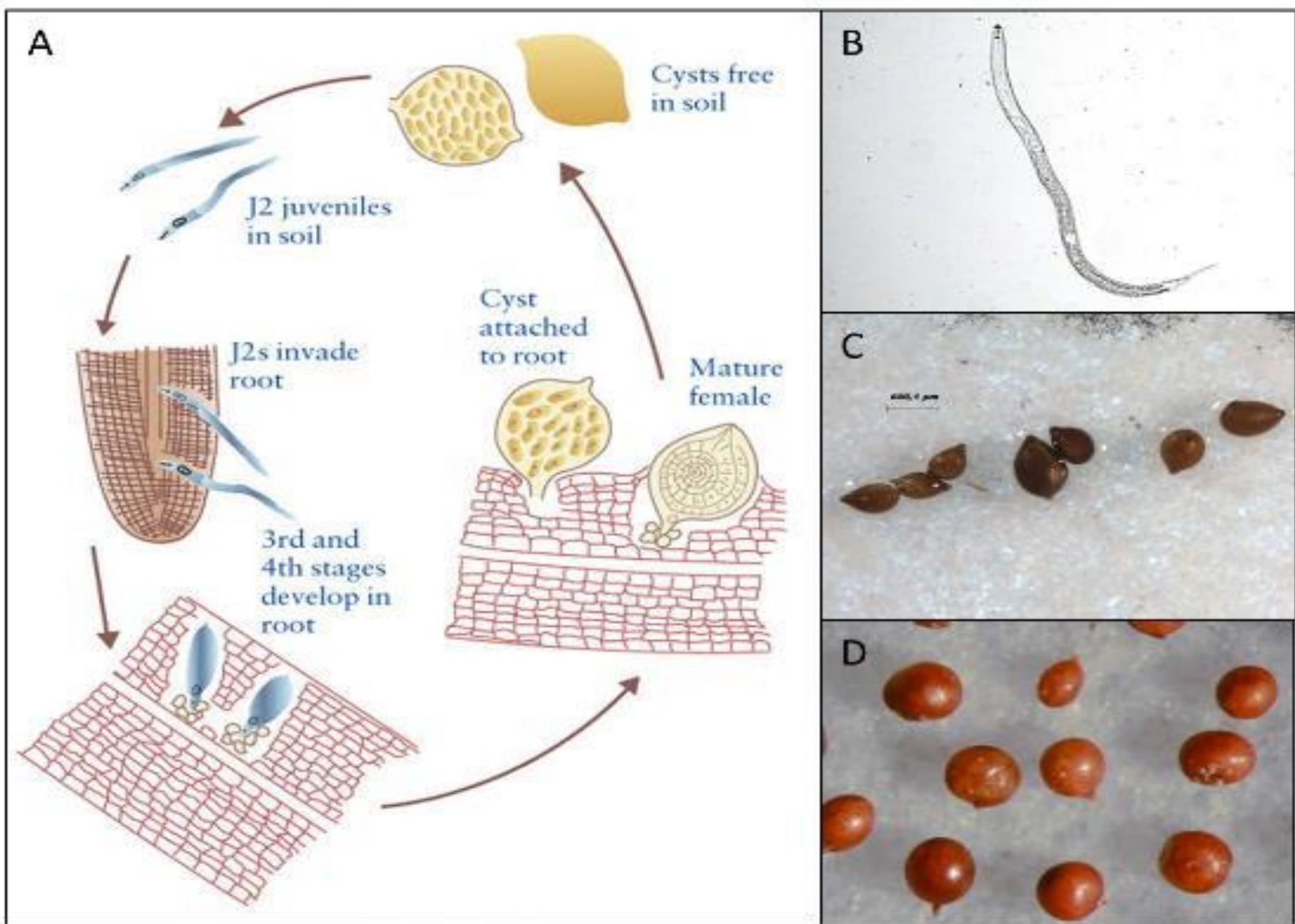
Ce syncytium va s'étendre longitudinalement pour permettre à la larve de passer ces différents stades larvaires (mue) jusqu'au stade adulte.

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

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

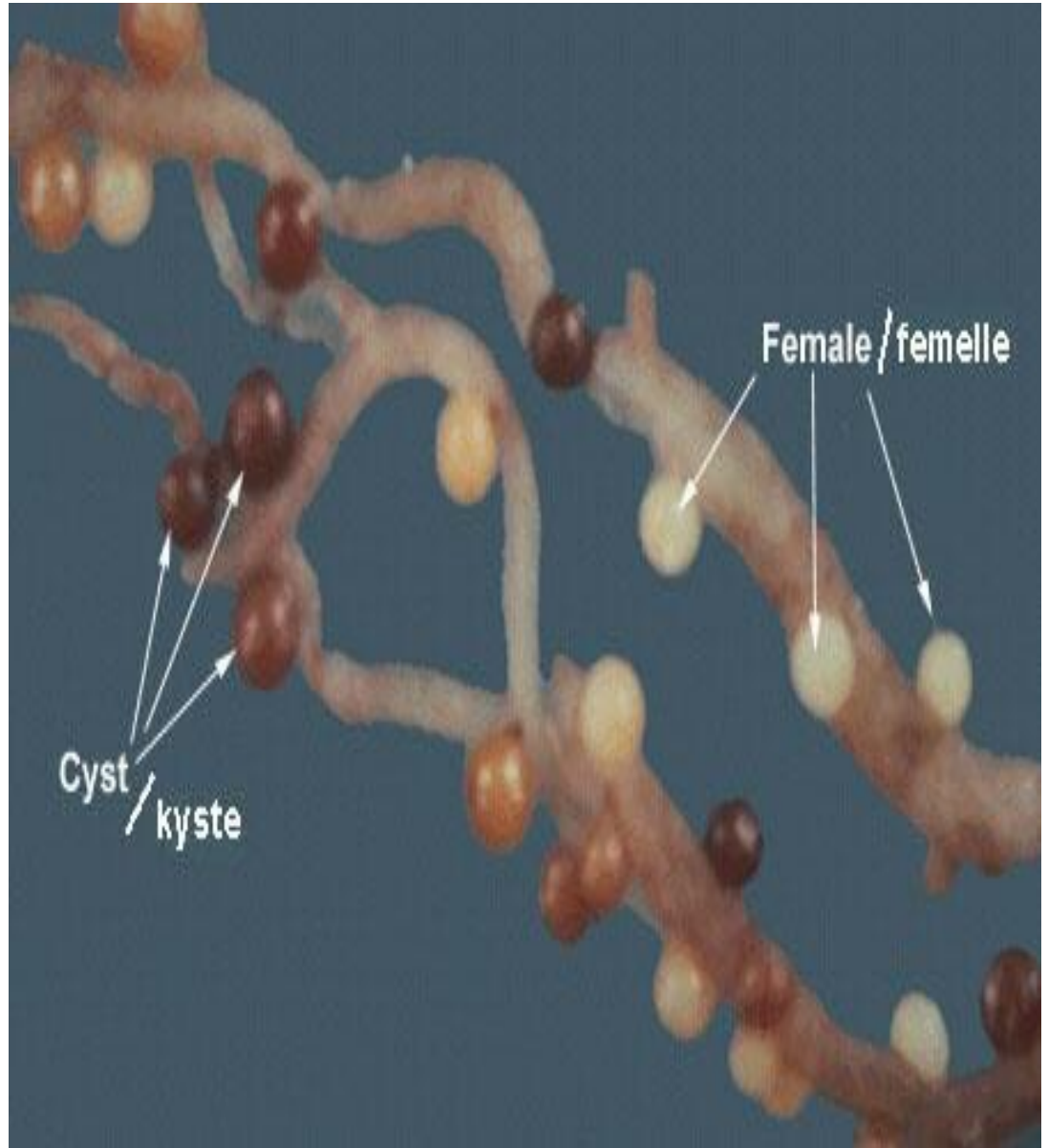
Le kyste est une forme de protection très efficace pour les œufs.

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



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

Photos de kystes



Photos de Galles :







Les différents modes de parasitismes des Nématodes

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

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

1. Les ectoparasites

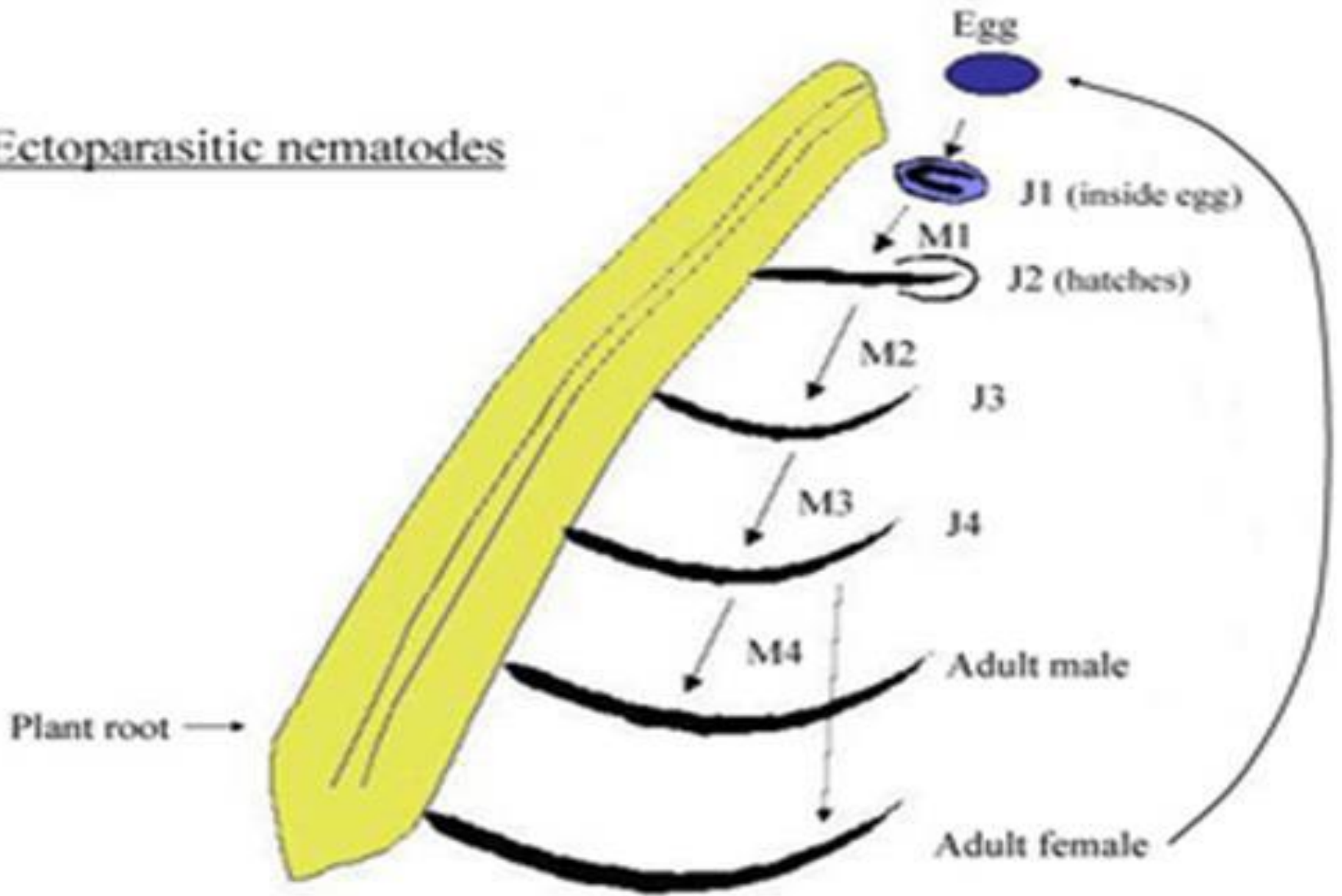
Ils ne pénètrent jamais entièrement dans les racines, il n'y a que le stylet qui traverse les cellules se trouvant à la périphérie des racines.

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

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

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

Ectoparasitic nematodes



Coupe longitudinale d'une racine parasitée par des nématodes ectoparasites

2. *Les endoparasites migrants*

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

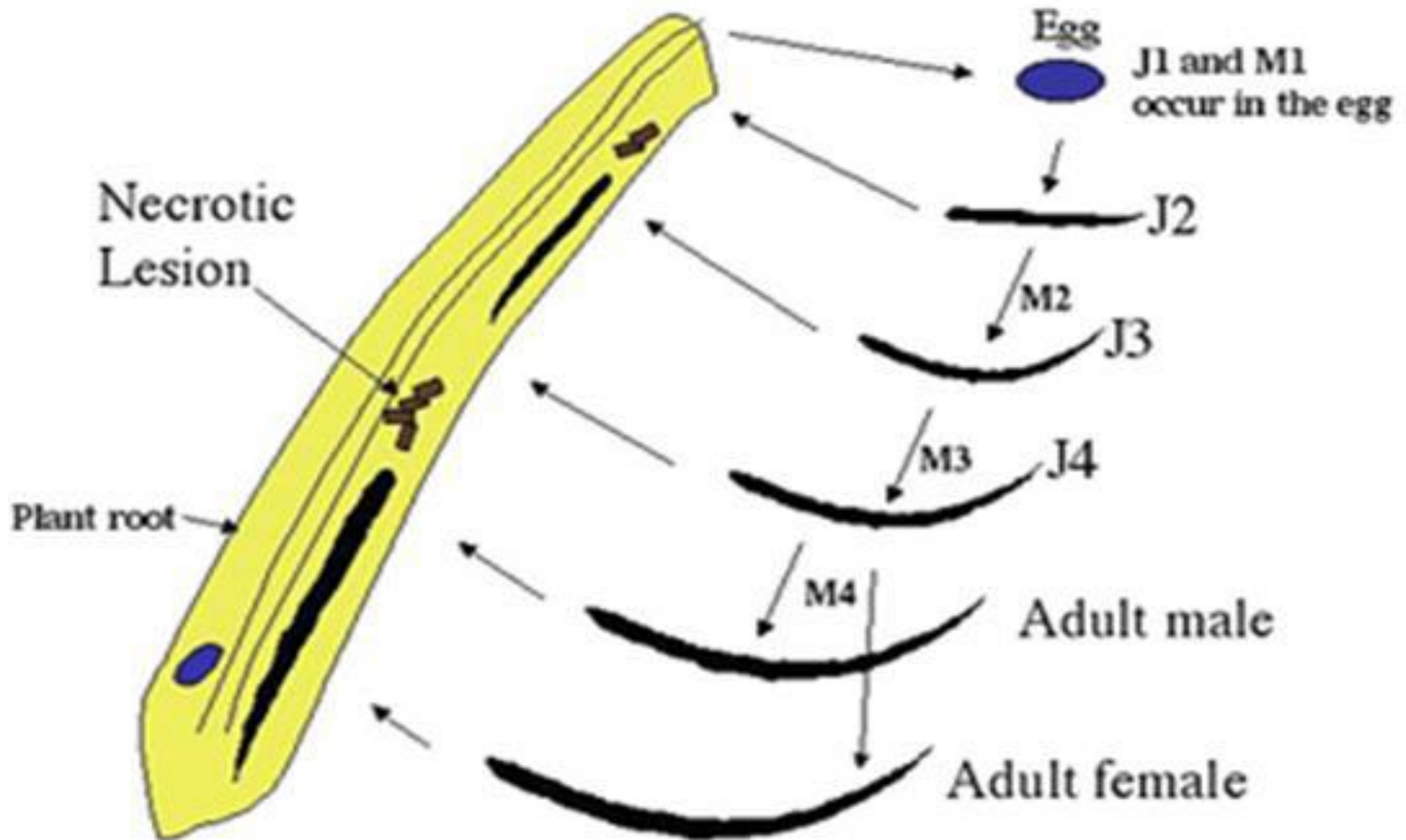
Ces nématodes passent la plus grande partie de leur vie dans la racine. Ils vont pouvoir s'y mouvoir et se reproduire.

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

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

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

Migratory Endoparasitic Nematodes



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

3. *Les endoparasites sédentaires*

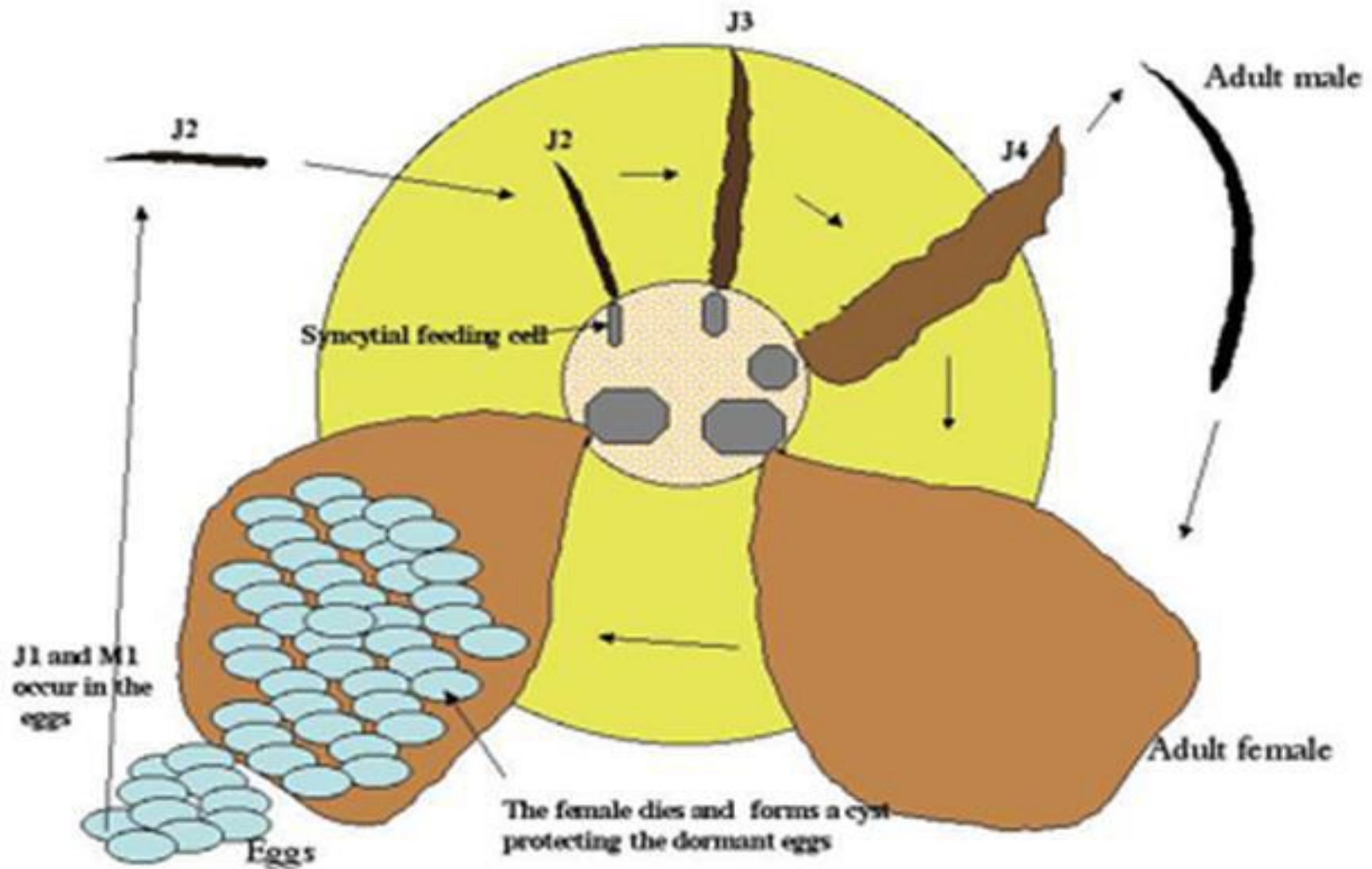
Dans ce cas nous parlons des nématodes à galles et à kystes (décrits dans le paragraphe : « *II- a)- 6. Cycle de vie des nématodes phytopathogènes à galles et à kyste.* »

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

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

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

Sedentary Endoparasitic Nematodes



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

4. *Les semi-endoparasites*

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

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

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

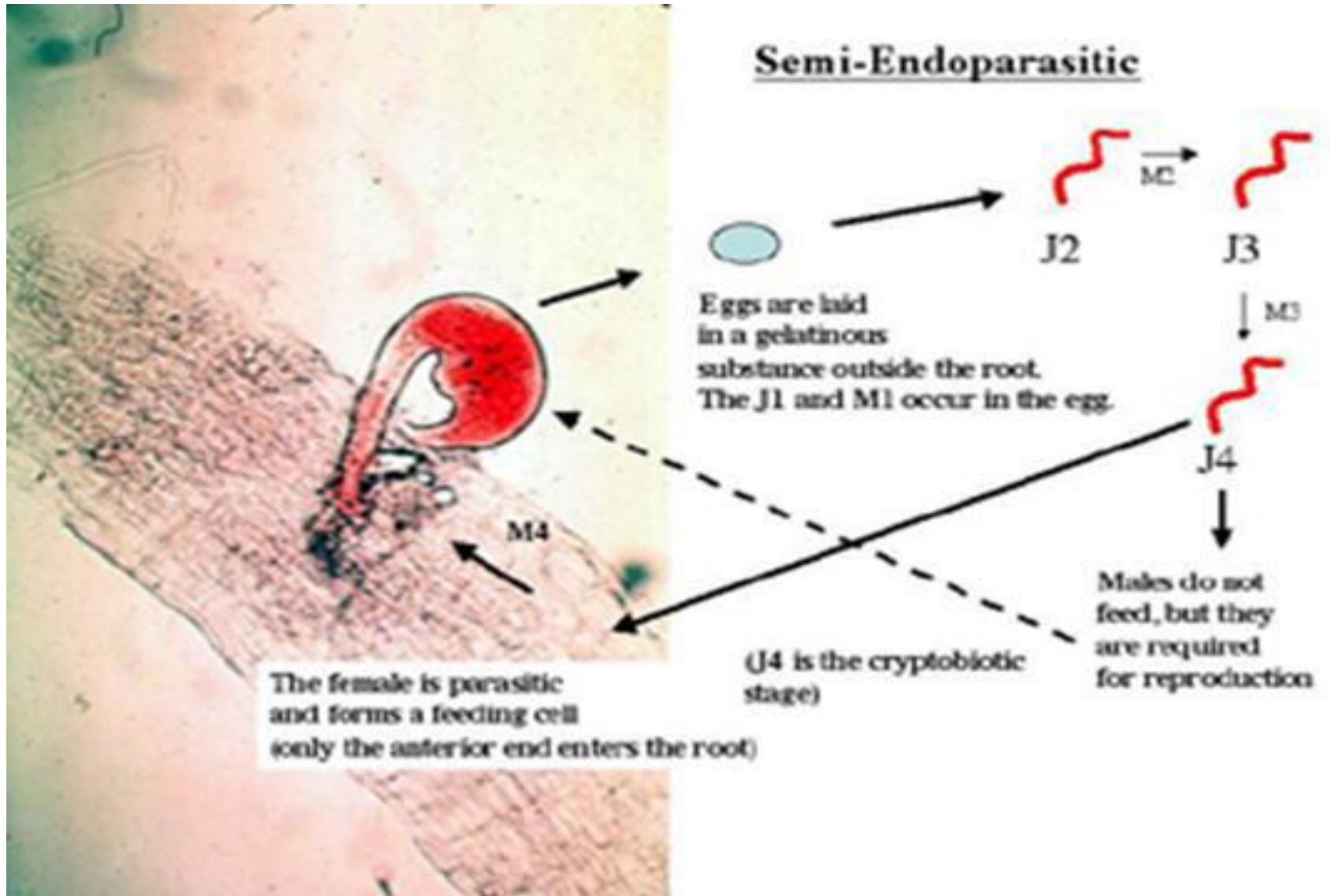


Schéma du cycle de vie des nématodes ecto-endoparasites

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

5. *Les Nématodes des tiges et des bulbes*

- Les nématodes peuvent attaquer aussi les parties supérieures des plantes.
- Ils utilisent des films d'eau pour remonter la tige de la plante.
- Les larves L4 pénètrent la plante par les tissus végétaux des tiges ou des bulbes. Cependant, les larves peuvent remonter et pénétrer les pousses par l'intermédiaire de bourgeons, de pétioles ou de stomates.
- Une fois dans la plante hôte, les larves muent en adultes qui se reproduisent, se nourrissent en tant qu'endoparasites migrants et détruisent les différents organes infectés (les cellules infectées nécroses).
- Le genre le plus connu est *Ditylenchus*.

Stem and Bulb Nematodes

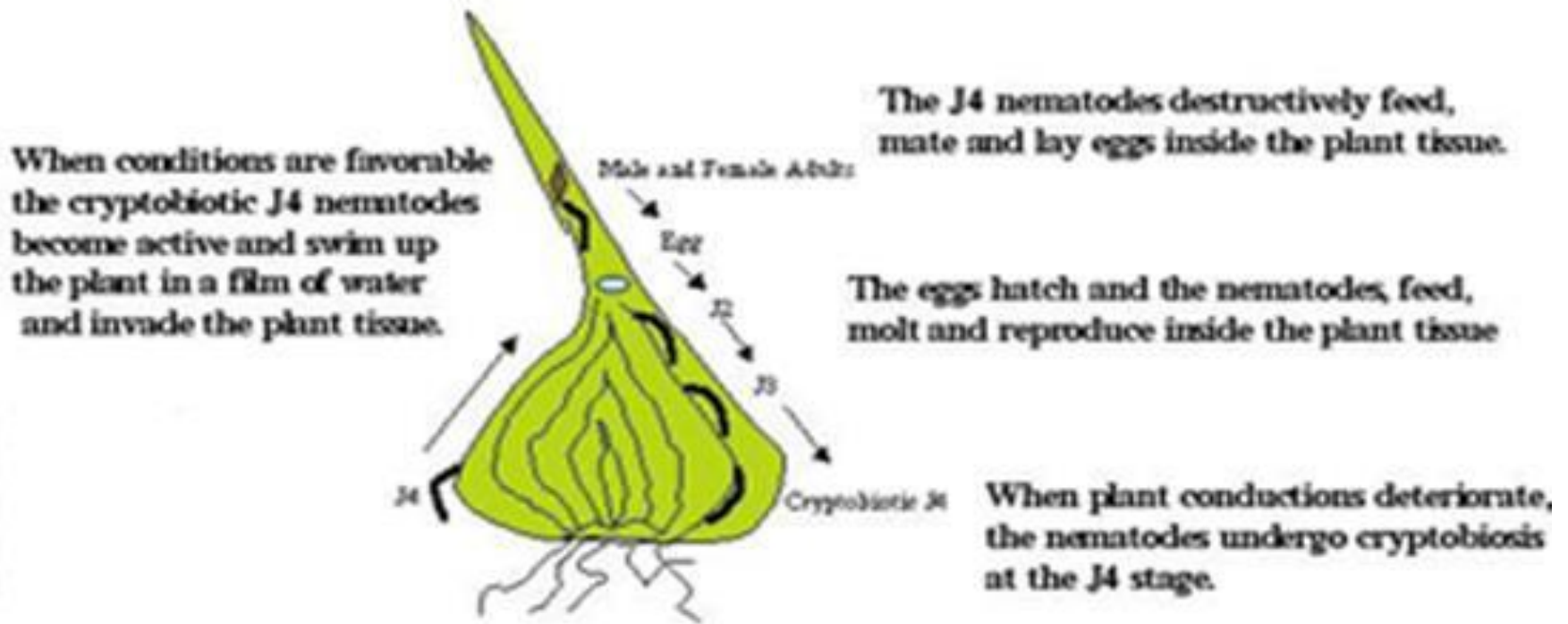


Schéma d'un bulbe infecté par des nématodes

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

6. *Nématodes foliaires*

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

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

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

Le seul genre connu est celui des *Aphelenchoides*.

7. Les principaux nématodes nuisibles des cultures

1. Les nématodes des cultures maraichères : les *Meloidogyne*
2. Les nématodes de la pomme de terre : les *Globodera*
3. Les nématodes des céréales : *Heterodera avenae*
4. Les nématodes des légumineuses : *Ditylenchus dipsaci*
5. Les nématodes des arbres fruitiers et de la vigne
 5. 1. Les nématodes de la vigne : *Xiphinema index*
 5. 2. Les nématodes des agrumes *Tylenchulus semipenetrans*
 5. 3. Les nématodes des autres arbres fruitiers : *Pratylenchus*

8. Symptômes d'attaques de nématodes

Le plus grand défi lorsqu'il s'agit de reconnaître les nématodes comme responsables des dommages observés sur une culture tient au fait que la plupart d'entre eux ne produisent pas de symptômes spécifiques, faciles à identifier.

En effet, les attaques de nématodes sont le plus souvent non spécifiques et facilement confondues avec des symptômes d'origine abiotique ou biotique. Par exemple, les symptômes de chlorose peuvent être dus à une déficience en azote mais aussi à la présence de nématodes, de la même manière une faible croissance peut être causée par un manque de fertilité du sol ou de stress hydrique mais également par la présence de nématodes.

9. Symptômes sur les parties aériennes

Les symptômes sur les parties aériennes se divisent en deux catégories : ceux qui sont causés par des nématodes des parties aériennes qui attaquent le feuillage et ceux qui sont causés par des nématodes du sol attaquant les racines

Symptômes causés par les nématodes des parties aériennes

Ce sont souvent des symptômes spécifiques associés à des nématodes plus aisés à diagnostiquer. Ils comprennent:

- Formation de galle, ou gonflement anormal des grains (Anguina) ou des feuilles (Cynipanguina)

- Des stries sur feuille, blanchissement et décoloration des feuilles (particulièrement sous climat tempéré) (*Aphelenchoides*)
- Épaississements, crevasses et croissance désorganisée des tissus (*Ditylenchus*)
- Nécrose interne de la tige, association avec un anneau rouge (*Bursaphelenchus cocophilus*)
- Nécrose de l'inflorescence
- Chlorose/brunissement des feuilles (aiguilles de pins), possible mort de l'arbre (*Bursaphelenchus xylophilus*).



Déformation des épis d'orge et de blé
en présence du nématode des épis
Anguina tritici



Plissement/entortillement des
feuilles de riz par *Ditylenchus*
angustus



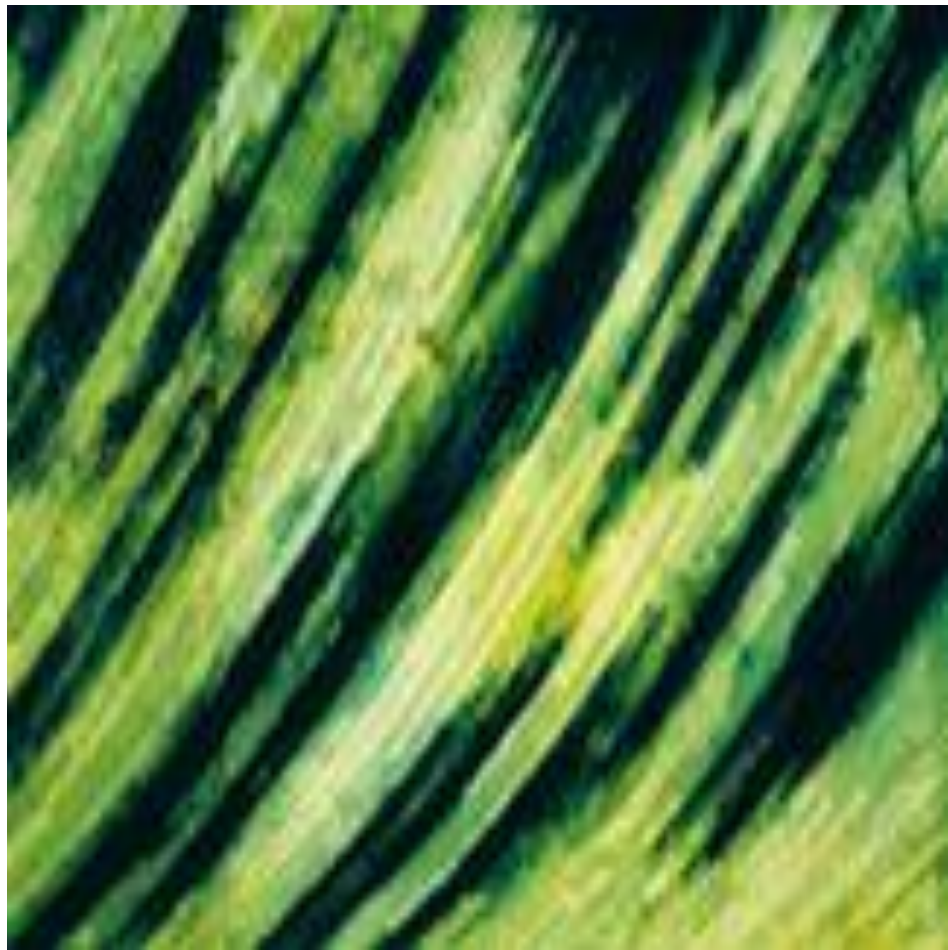
Maladie du bout blanc du riz causé par *Aphelenchoides besseyi*



Symptôme de l'anneau rouge (*Bursaphelenchus cocophilus*) dans un tronc de cocotier



Maladie d'Ufra sur riz causé par
Ditylenchus angustus



Stries et décolorations en rayures sur feuille de
bananier Ensete (*Musa*) causé par
Aphelenchoides sp.



Pieds d'avoine sévèrement attaqués par le nématode des tiges, causant le développement clairsemé, le rabougrissement, la chlorose (gauche) et l'épaississement du plateau de tallage (droite) associé à une infestation par *Ditylenchus dipsaci*

Galle sur grain de blé causée par *Anguina tritici* (grain écrasé montrant l'émergence d'oeufs et de juvéniles)

Symptômes des parties aériennes causés par des nématodes attaquant le feuillage.



Chlorose et croissance réduite d'un pied de riz en présence de *Heterodera sacchari*



Chlorose en taches et défaut de croissance des feuilles basses de blé en présence *Heterodera spp*



Floraison/maturité retardée et croissance réduite en tâche sur des plants de pomme de terre attaqués par le nématode à kyste



Réduction de la taille de bananiers
plantains avec *Pratylenchus coffeae*.



Réduction du tallage et distribution en taches
sur blé attaqué par le nématode agent de
lésions (*Pratylenchus neglectus*)



Dépérissement d'un citrus avec
Radopholus similis



Chute d'un plant de bananier causé par
Radopholus similis.



Distribution en taches, nanisme et chlorose de pieds de maïs attaqués par le nématode
à galles (*Meloidogyne spp.*)

Symptômes sur parties aériennes occasionnés par des nématodes attaquant les racines.

10. Symptômes causés par les nématodes des racines

Les nématodes des racines sont la cause, à des degrés divers, de défauts de croissance des parties aériennes, mais ces symptômes ne sont généralement pas suffisants pour diagnostiquer un problème nématologique.

La plupart de ces symptômes peuvent être le reflet ou confondus pour d'autres problèmes comme une alimentation insuffisante en eau ou une déficience de l'absorption minérale. Ils comprennent:

- Chlorose (jaunissement) ou toute autre coloration anormale du feuillage
- Croissance inégale et réduite
- Feuillage fin et peu fourni
- Symptômes liés au stress hydrique comme flétrissement de la plante ou enroulement des feuilles
- Mort de plantes pérennes ou ligneuses avec peu ou pas de nouvelles feuilles
- Réduction de la taille des fruits et des graines
- Faiblesse des récoltes.

D'autres symptômes peuvent suggérer une infestation par les nématodes:

- Mauvaise réponse à l'application des engrais
- Une tendance à réagir plus rapidement au stress hydrique que des plantes saines, des difficultés à reprendre après un flétrissement
- Peu ou pas de développement du feuillage au début de la nouvelle saison de croissance
- Problème important d'adventices (fort envahissement), dû à une moindre compétitivité des plantes infestées par les nématodes
- Plus grande susceptibilité aux maladies, en raison d'une moindre résistance des plantes infestées par les nématodes.

11. Symptômes sur parties souterraines

Ils sont dus aux nématodes et sont parfois suffisamment spécifiques pour autoriser le diagnostic d'un problème nématologique. L'arrachage des plantes ou le dégagement des racines est nécessaire pour observer les symptômes. Les symptômes comprennent:

- Formation de galles
- Racines raccourcies, épaissies, enflées à leurs extrémités
- Lésions sur les racines
- Nécroses sur les racines et les tubercules, pourrissement et mort des racines
- Crevasses sur racines et tubercules
- Présence de kystes ou de ‘perles’ sur les racines
- Racines déformées
- Architecture racinaire altérée.

12. Les méthodes de lutte

Les pertes, dues aux nématodes, au niveau mondial, peuvent être estimées à

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

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

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

Le contrôle des nématodes implique 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).

1. 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.

A. Prévention de la dissémination.

a/ Les mesures prophylactiques

Les mesures prophylactiques ont pour objectifs :

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

Ce sont des mesures nécessaires et indispensables pour limiter les infestations par les nématodes. Cependant, elles ne sont souvent pas suffisantes et sont la plupart du temps peu suivies. Comme les nématodes se disséminent par le matériel et les personnes, les mesures prophylactiques se résument par

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

b) La lutte Chimique.

- Utilisés jusqu'à récemment, les nématicides chimiques sont des produits extrêmement toxiques pour l'Homme, pour les animaux mais aussi très polluants pour les nappes phréatiques et très dangereux pour la couche d'ozone.
- Ces molécules chimiques sont radicales face aux nématodes. En effet elles permettent de détruire 80 à 90% des parasites d'une culture infestée. Cependant, leur utilisation est limitée voire interdite à cause de leur toxicité sur l'environnement et pour les utilisateurs.

De plus

- Ils ne permettent de traiter que les 20 à 30 premiers centimètres du sol. Les nématodes des couches profondes ne sont donc pas détruits et attaquent les cultures suivantes, ce qui nécessite des traitements répétés.
- Ils peuvent être utilisés de deux façons différentes soit par fumigation ou par action systémique

1. La méthode par fumigation

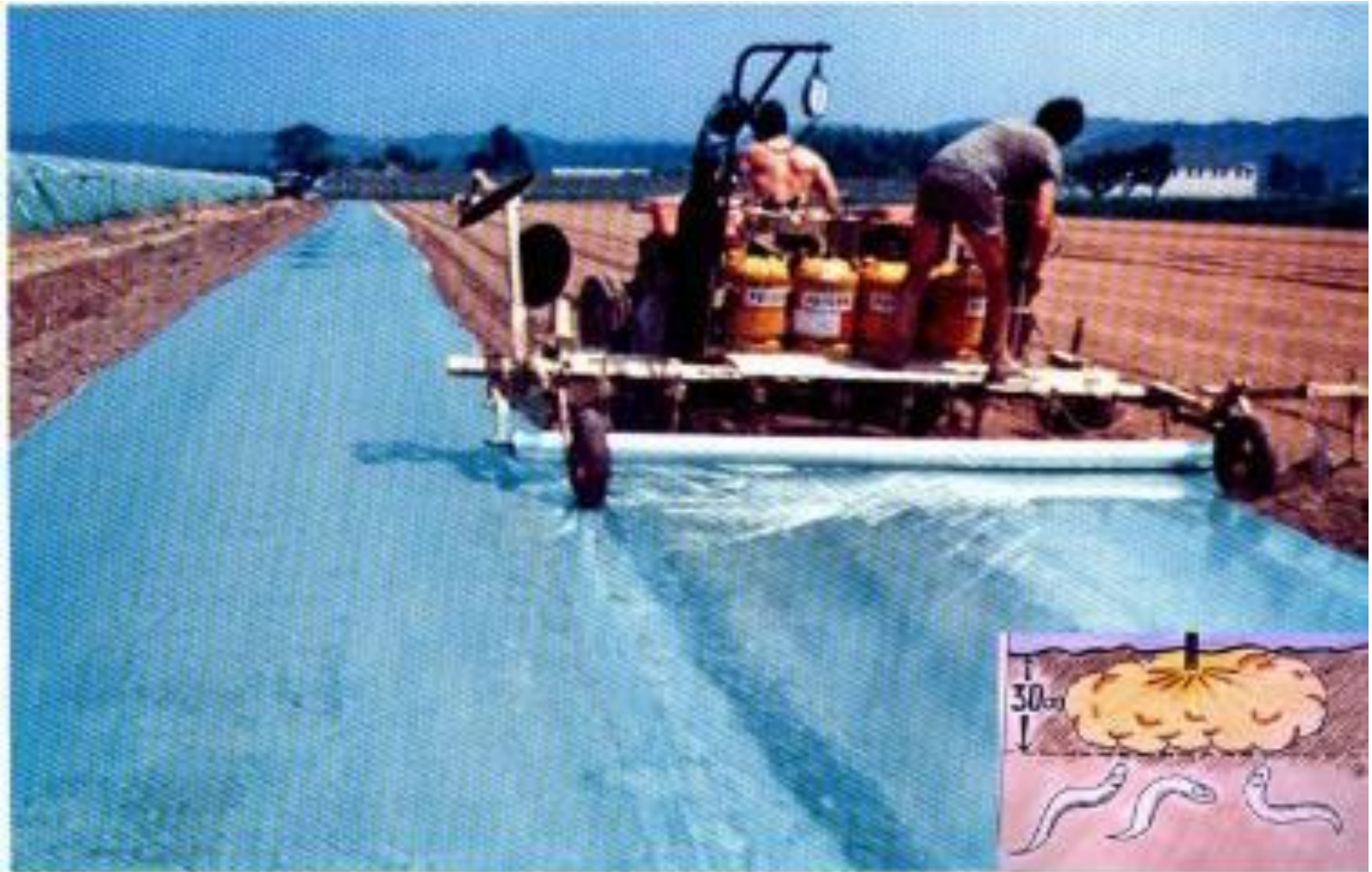


Photo représentant la méthode par fumigation

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

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

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

2. La méthode par action systémique

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

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

On peut distinguer plusieurs types de pesticides systémiques en fonction de leur mode d'administration

- Les pesticides systémiques translaminaires qui pénètrent dans les tissus de la plante après pulvérisation et qui sont diffusés par le phloème
- Les pesticides systémiques en Traitement de Semences (TS) qui pénètrent dans la plante par les racines et qui sont diffusés par la sève via le xylème (de bas en haut)
- Les molécules chimiques sont des molécules très actives dans la lutte des nématodes. Cependant il s'agit d'un moyen de lutte très onéreux et surtout très dangereux pour la faune et la flore adjacentes. De plus, elles deviennent de moins en moins autorisées par les autorités car elles ont des actions non seulement toxiques mais aussi cancérigènes

c) La lutte physique.

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

1. La jachère nue :

- Elle a pour principe de laisser nu la terre pendant plusieurs mois ou années et surtout durant les saisons sèches.
- En effet, sans végétaux hôtes, les parasites ne peuvent survivre et sont détruits. Cependant cette méthode peut entraîner des dégradations de la qualité du sol, telles que la perte de l'azote en profondeur lors de fortes pluies, le tassement du sol lors d'intervention de labourage voire même des problèmes de ravinement

2. La submersion

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

3. La vapeur d'eau sous pression

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

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

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

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

4. La solarisation

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

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

Cette technique présente quelques défauts :

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



d) La lutte biologique

- *1. Les plantes pièges*

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

Ces plantes nématicides peuvent agir contre les nématodes en :

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

2. Pasteuria penetrans : la bactérie parasite des nématodes

- *Pasteuria penetrans est un micro-organisme procaryote actinomycète présent naturellement dans le sol.*

3. Les champignons

- Paecilomyces
- Ophiocordyceps (= Hirsutella)
- Verticillium
- Stropharia