

République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement et de la recherche scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers (SNV &STU)
Département d'Ecologie et Génie de l'Environnement

Support de cours de la matière :
Phytopathologie, concepts généraux

Niveau d'études : L3 Licence

Filière : Sciences biologiques

Parcours : **Biologie et physiologie végétale**

Semestre : 6

Réalisé par
Dr. ALLIOUI Noura
Mars 2020

Chapitre III

Les maladies parasitaires des plantes

3.1. Introduction

Les maladies parasitaires des plantes sont causées par des agents vivants. Le terme « parasitisme » est généralement utilisé pour désigner la relation ou l'association existant entre des organismes généralement d'espèces différentes et dans laquelle, un partenaire (parasite) bénéficie de l'autre (l'hôte).

Les plantes supérieures peuvent être parasitées par différents types de microorganismes : champignons, bactéries, virus, nématodes, ... et aussi par des phanérogames parasites.

3.2. Le parasitisme et le développement des maladies

3.2.1. Parasitisme et pathogénicité

- Le **parasite** (du grec : *para* = à côté, et *sitos* = nourriture) est un organisme qui se développe sur/ou dans un autre organisme (hôte) et obtient de ce dernier les éléments nutritifs dont il a besoin pour sa croissance et sa multiplication.

- Du point de vue de l'écologie, l'« attaque » d'un parasite n'est pas uniquement une agression puisque celui-ci, du fait même qu'il habite son hôte, n'a le plus souvent pas « intérêt » à détruire cet abri. Que le parasite prélève sa nourriture sur place et provoque une certaine pathologie, voire augmente le risque de mortalité, n'en fait pas forcément un « tueur », ceci permet de définir les concepts suivants :

- La **compétition** qui se produit entre les deux organismes sur l'eau et les éléments nutritifs entraîne généralement une diminution de la croissance de l'hôte.

- Le **pathogène** est un agent biologique (vivant) capable de provoquer une maladie infectieuse.

- Dans plusieurs cas, le **parasitisme** est lié à la **pathogénicité** : la capacité du parasite de pénétrer et d'envahir les tissus de l'hôte, conduit généralement au développement de la maladie. Cependant, dans la plupart des maladies, les dommages notés sur la plante hôte ne peuvent pas être obligatoirement liés au prélèvement des substances nutritives par le pathogène, mais sont attribués à des substances toxiques libérées par le pathogène ou à des réactions de la plante hôte.

- De ce fait les concepts de parasitisme et de pathogénicité sont bien élucidés :

- *Parasitisme* = prélèvement de substances nutritives de l'hôte par le parasite.
- *Pathogénicité* = interactions du pathogène avec une ou plusieurs fonctions essentielles de la plante hôte (prélèvement de substances nutritives + sécrétion de substances par le pathogène + réaction de la plante hôte).

3.2.2. Développement de la maladie

Dans toutes les maladies infectieuses, il y a une succession d'évènements distincts qui composent le cycle de la maladie, qui correspond le plus souvent au cycle de développement du pathogène. Le développement d'une maladie dépend de trois facteurs : le pathogène, la plante et l'environnement (Fig. 01) :

- La plante doit être sensible ou prédisposée à développer une infection.
- L'agent pathogène, doit être virulent (c'est-à-dire biologiquement équipé pour infecter une plante.
- L'interaction entre la plante hôte et l'agent pathogène doit se produire dans un environnement propice à la contamination.

L'interaction des trois facteurs cités ci-dessus peut être illustrée selon un schéma appelé le « *Triangle de la maladie* » (Fig. 01a).

Certains phytopathologistes révèlent que le temps nécessaire à l'interaction de ces trois facteurs, et qui traduit le « *temps nécessaire à l'infection* » est un paramètre qui doit être pris en considération dans certaines interactions plante-pathogène (par exemple, des spores de *Puccinia triticina* agent de la rouille brune du blé, déposées sur les feuilles d'une variété hôte sensible, en conditions d'humidité et de températures favorables à leurs croissance, exigent une durée de quelques heures pour germer et former les structures d'infection. Ce qui a permis d'ajouter un quatrième facteur et de proposer un autre schéma illustré selon la « *Pyramide de la maladie* » (Fig. 01b).

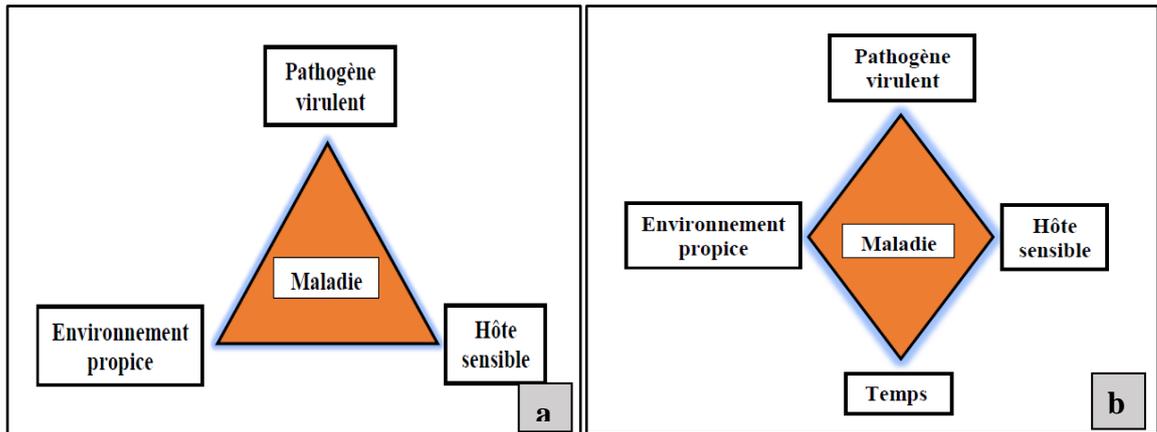


Figure 01 : Facteurs favorisant le développement d'une maladie parasitaire chez les végétaux :
a : « Triangle de la maladie », **b :** « Pyramide de la maladie ».

3.2.2.1. Stades de développement d'une maladie

Lorsque les conditions sont réunies, le cycle de la maladie passe par les phases suivantes :

a- L'inoculation (le contact)

L'inoculation est la première étape du cycle de développement d'une maladie parasitaire, elle correspond à la mise en contact du pathogène et de la plante hôte.

« L'inoculum » qui correspond à l'agent pathogène « en entier » ou une partie du pathogène ayant la capacité de provoquer l'infection, doit être présent et en quantité suffisante.

Selon la nature du pathogène, on peut distinguer différents types d'inoculum :

- **Pour les champignons** : l'inoculum peut être un fragment de mycélium, des spores ou des sclérotés (masses de mycélium).
- **Pour les bactéries, les mycoplasmes** : l'inoculum peut être généralement l'individu en entier.
- **Pour les virus** : l'inoculum peut être le virus en entier ou bien son acide nucléique.
- **Pour les nématodes** : l'inoculum peut être, un individu adulte, des larves ou des œufs du nématode.
- **Pour les phanérogames parasites** : l'inoculum peut être formé de parties de la plante ou des graines.

L'inoculum est appelé **inoculum primaire** quand il se conserve en un stade dormant durant la saison défavorable et cause l'infection originale appelée **infection primaire**. Les inoculums produits à partir de l'infection primaire sont connus sous le nom d'**inoculums secondaires** et causent les **infections secondaires**.

b- La pénétration

Le pathogène pénètre dans l'hôte directement (champignons, plantes parasites), à travers des ouvertures naturelles (nématodes) ou à travers des blessures (bactéries, virus, ...). La pénétration des agents pathogènes à l'intérieur des cellules des plantes hôtes peut se faire par différentes manières :

- Pénétration directe : par voie physique, où l'agent pathogène dégrade « par force » les parois cellulaires de l'hôte et détruit la cuticule, ou bien par voie biochimique, qui s'opère par la libération d'enzymes de dégradation des tissus végétaux (pectinases, cutinases, cellulases, hemicellulases, ...).
- Pénétration à travers les ouvertures naturelles (stomates, lenticelles, hydathodes, nectarthodes, sites d'émergence de nouvelles racines).
- Pénétration à travers les blessures.

c- L'infection

C'est le processus par lequel les pathogènes entrent en contact avec les cellules et les tissus de la plante hôte pour puiser leurs aliments. Durant l'infection, le pathogène se multiplie et continue sa croissance ; on parle alors d'**invasion**. C'est au cours de cette phase que les symptômes apparaissent sur la plante. La période comprise entre l'inoculation et l'apparition des symptômes est la période d'incubation. Cette période varie en fonction de la nature du pathogène, de la plante hôte et son stade de développement, et des facteurs de l'environnement, notamment, la température.

d- La croissance et la multiplication des agents pathogènes

Les champignons parasites des plantes supérieures, en général, envahissent et infectent les tissus de l'hôte par leur croissance et leur développement à l'intérieur des cellules à partir d'un point initial d'inoculation. La plupart de ces agents pathogènes, qui produisent de petites taches, de grandes surfaces d'infection, ou de nécroses générales, continuent leur développement jusqu'à l'invasion de tous les tissus de l'hôte, la généralisation de l'infection et la mort de la plante.

- **Modes de multiplication :** Les agents phytopathogènes se reproduisent suivant plusieurs formes :
 - Les champignons se reproduisent par des spores sexuées ou asexuées.
 - Les plantes parasites des plantes supérieures se reproduisent comme les plantes hôtes, par des semences ou des graines.
 - Les bactéries, les mycoplasmes et les protozoaires, se reproduisent par division cellulaire (1 individu → 2 individus → 4 individus ...).
 - Les virus et les viroïdes se multiplient par cellules (code copié).
 - Les nématodes se reproduisent par la formation d'œufs.

- **Vitesse de multiplication :** La vitesse de multiplication varie considérablement avec la nature de l'agent pathogène :
 - **Pour les champignons :** des milliers ou des centaines de milliers de spores peuvent être produites par Cm^2 de tissu infecté. Chaque sporophore peut produire des milliers de spores.
 - **Pour les bactéries :** le nombre de bactéries peut doubler après 20 à 30 minutes, tant que les conditions environnementales (plus particulièrement, la température) restent favorables, et l'hôte est susceptible.
 - **Pour les virus et les viroïdes :** quelques heures après l'infection ou la détection des premières particules virales, une cellule de l'hôte peut contenir 100 000 à 10 000 000 particules virales.
 - **Pour les nématodes :** une femelle peut pondre 300 à 600 œufs, parmi lesquelles 50 % sont également des femelles, et chacune va donner naissance à 300 à 600 individus, selon la susceptibilité de l'hôte, le climat et le cycle de l'agent pathogène. Les nématodes peuvent donner jusqu'à une douzaine de générations par an.
 - **Pour les phanérogames parasites :** le nombre de graines formées peut être considérable, notamment pour les plantes produisant de petites graines.

e- La dissémination des agents pathogènes

La dissémination ou la dispersion des agents pathogènes peut se faire selon plusieurs modes :

- *Dissémination par l'air* : s'opère surtout chez les champignons ou les plantes supérieures parasites où les spores ou les graines projetées à quelques millimètres de leur orifice de fructification, peuvent parcourir avec le vent des centaines de kilomètres (rouilles des céréales). Les bactéries, et les nématodes peuvent être transportés avec les particules du sol.

- *Dissémination par l'eau* : l'eau joue également un rôle important dans la dissémination des agents pathogènes. Des bactéries, des nématodes, des spores, ou des sclérotés de champignons présents dans le sol peuvent être disséminés par l'eau de pluie ou d'irrigation. D'autre part, des bactéries et des spores fongiques se trouvant dans l'air peuvent être transportées dans des gouttelettes d'eau de pluie. Toutefois la distance de dissémination par l'eau n'est pas aussi importante que pour la dissémination par le vent (l'air). Cependant, pour ce mode de dissémination, la germination des spores transportées est immédiate (humidité favorable).

- *Dissémination par les insectes, les nématodes et autres vecteurs* : les agents pathogènes peuvent être également disséminés par :

- Les insectes et plus particulièrement, les pucerons sont les vecteurs de dissémination les plus importants pour les virus et les mycoplasmes (par leur passage d'une plante malade à une plante saine).
- Les bactéries peuvent être transportées par des nématodes et autres animaux.
- Certains agents pathogènes adhèrent aux pattes des animaux et sont disséminés par ces derniers.

3.2.2.2. Notion d'épidémiologie

L'**épidémiologie** est la branche de la phytopathologie étudiant l'extension spatiale et temporelle des maladies au sein d'une population de plantes.

Une épidémie phytopathologique englobe la série des événements qui se succèdent dans une population végétale envahie par un agent pathogène : l'apport de l'inoculum, le contact entre l'agent pathogène et la plante hôte, la pénétration, l'infection et la constitution d'un nouvel inoculum et sa dispersion. Le développement épidémique implique que cette séquence se répète plusieurs fois pendant des cycles successifs produisant une quantité croissante de maladie et

d'inoculum autant que les conditions environnantes, notamment climatiques demeurent favorables et que la population des hôtes reste réceptive.

3.3. Paramètres à mesurer pour l'estimation d'une maladie

Pour l'estimation d'une maladie, trois paramètres peuvent être pris en considération :

a- L'**incidence** : l'incidence est souvent utilisée pour mesurer l'importance de la maladie dans un champ ou sur l'individu infecté.

b- L'**intensité** : l'évaluation des intensités de maladie s'effectue en quantifiant les symptômes ou le nombre de lésions présentes ; elle est également appelée : **sévérité** de la maladie.

c- La **perte** : on utilise souvent le rendement pour mesurer les pertes par une maladie donnée.

Ces trois paramètres (incidence, intensité, perte) peuvent être dépendants l'un de l'autre (plus l'incidence est importante, plus les pertes sont considérables).

3.4. Principaux groupes de maladies parasitaires des végétaux

3.4.1. Les maladies cryptogamiques (fongiques)

Les champignons phytopathogènes sont la principale cause de pathologies végétales et les pertes de rendement associées à ces maladies permettraient de nourrir plusieurs centaines de millions d'individus chaque année.

3.4.1.1. Caractéristiques des champignons phytopathogènes

- Morphologie et cytologie des champignons phytopathogènes :

Comme toutes les espèces fongiques, les champignons phytopathogènes sont des thallophytes, eucaryotes non chlorophylliens ; l'appareil végétatif (thalle ou mycélium) peut être **cloisonné** : formé d'hyphes, ou **non cloisonné** : formé de siphons. Les cellules possèdent les caractéristiques générales des eucaryotes. La paroi cellulaire renferme 80 à 90 % de polysaccharides associés principalement à des protéines et des lipides, la chitine représente le constituant glucidique le plus important des parois cellulaires (à l'exception des phycomycètes où elle est absente). Ces parois ont fréquemment une couleur sombre due à des composés mélaniques dérivant d'acides aminés phénoliques qui jouent un rôle lors de l'infection.

- **Mode de vie et besoins nutritionnels** : Etre à la fois hétérotrophes vis - à- vis du carbone et dépourvus du pouvoir de phagocyter des substances solides, les

champignons sont réduits à absorber des substances organiques et minérales à l'état dissous, qu'ils puisent des cellules de leurs hôtes ; et quel que soit leur mode de vie (saprophytes, parasites ou symbiotes) ils ont besoins :

- D'eau, de sels minéraux (PO_4^{3-} , NO_3^- , ...) et d'oligo-éléments (Fe, Cu, ...).
- D'une source de carbone organique.
- De l'azote minéral.

Dans le règne végétal, tous les taxons peuvent être parasités par des champignons ; selon leur degrés de parasitisme, les champignons phytopathogènes peuvent être : des saprophytes facultatifs, des parasites obligatoires ou facultatifs (parasites pendant une partie de leur cycle biologique et saprophytes pendant l'autre partie).

Certains agents phytopathogènes sont **polyphages** : colonisent des centaines d'espèces végétales (*Botrytis cinerea*), tandis que d'autres sont **spécialisés** : infectent quelques espèces voisines, ou les espèces d'une même famille (*Phytophthora infestans* pour les solanacées). Parfois les espèces fongiques comportent des « **formes spécialisées** » dont le parasitisme est spécifique à une seule espèce végétale : *Erysiphe graminis* agent causal de l'oïdium des céréales, constitue une seule espèce fongique dont les différents isolats sont capables d'infecter plus de 100 espèces végétales appartenant à 34 genres de graminées, et un isolat qui infecte le blé (*E. graminis* f.sp. *tritici*), n'infecte pas l'orge et vis-versa ; et à l'intérieur des formes spécialisées on peut trouver des « races » ou des « biotypes » dont chacune n'attaque que certains cultivars d'une espèce végétale.

- **Reproduction** : La plupart des champignons possèdent deux modalités de reproduction : la reproduction **asexuée** (végétative) et la reproduction **sexuée**. Le plus souvent, les organes de reproduction sexuée (spores) assurent la conservation des champignons phytopathogènes pendant la période d'arrêt de la végétation et constituent les sources de l'infection primaire des cultures. Les formes asexuées, émettent des propagules qui assurent l'extension secondaire des maladies (les épidémies).

La libération et la dissémination des germes (propagules, spores) de champignons sont assurées par une très grande diversité de mécanismes : la libération résulte de phénomènes actifs, et la dissémination est généralement anémophile ou par l'eau.

3.4.1.2. Principaux genres de champignons phytopathogènes

Le [tableau 11](#) résume les principaux genres de champignons et leurs symptômes caractéristiques.

Tableau 11 : Principaux genres de champignons phytopathogènes et leurs symptômes caractéristiques

Classes	Genres	Maladies (symptômes)
Plasmodiophoromycètes	- <i>Plasmodiophora</i> - <i>Polymyxa</i> - <i>Spongospora</i>	Infectent les poils radiculaires des végétaux et peuvent transmettre des virus parasites des plantes : <i>Polymyxa graminis</i> est un vecteur du virus de la mosaïque jaune de l'orge BYDV). La contamination des cultures se fait via les zoospores (irrigation, transport de terre ou utilisation d'outils contaminés).
Oomycètes (Phycomycètes)	- <i>Pythium</i>	Parasite de plantules dans les sols humides, agents des fontes de semis
	- <i>Phytophthora</i>	Ont un spectre d'hôtes très large, certains sont responsables de fontes de semis et de pourritures radiculaires, d'autres colonisent le feuillage (mildious).
	- <i>Peronospora</i> - <i>Plasmopara</i>	Parasites obligatoires, à mycélium intercellulaire, agent des mildious.
Zygomycètes	- <i>Mucor</i>	Les mucorales sont essentiellement des saprophytes qui se développent généralement sur les fruits
Ascomycètes et Deutéromycètes	- <i>Erysiphe</i>	Agents des « oïdiums », affectent toutes les espèces végétales et se développent essentiellement sur les feuilles, les jeunes pousses, les boutons floraux et les fruits : dépôts de poudre blanche sur les organes affectés.
	- <i>Septoria</i> / <i>Zymoseptoria</i> - <i>Cercospora</i> - <i>Helminthosporium</i> - <i>Ascochyta</i> - <i>Cladosporium</i>	Provoquent l'apparition de taches foliaires (chloroses et nécroses) sur le feuillage, et sont des agents de septorioses, d'anthracoses et d'helminthosporioses.
	- <i>Claviceps</i>	L'espèce <i>C. purpurea</i> , agent de l'ergot des graminées et des céréales (seigle), produit des alcaloïdes toxiques pour l'homme.
	- <i>Sclerotinia</i>	Agents de pourritures d'organes blessés ou sénescents.
	- <i>Venturia</i>	Se développent sur les feuilles et les fruits et provoquent la formation de taches noires superficielles, et peuvent être également à l'origine d'altérations corticales (chancres). Ce sont des agents de tavelures du poirier (<i>V. pirina</i>) et du pommier (<i>V. inaequalis</i>).

	- <i>Ceratocystis</i> - <i>Fusarium</i> - <i>Verticillium</i>	Responsables de maladies vasculaires et provoquent généralement un flétrissement des organes conduisant à la mort des plantes : la circulation de la sève se trouve freinée suite à un blocage des vaisseaux conducteurs par le mycélium ou les spores fongiques, ou par formation de thylles (protubérances globuleuses à l'intérieur des vaisseaux (thylloses).
Basidiomycètes	- <i>Urocystis</i>	Production de masses noires sur les feuilles.
	- <i>Tilletia</i>	Agents de « caries », produisent des masses noires dans les organes floraux. Chez les céréales infectées par <i>Tilletia caries</i> , le grain est déformé et est rempli de spores noires (un grain peut contenir 9 milles spores).
	- <i>Ustilago</i>	Agents de « charbons », <i>U. nuda</i> provoque le charbon nu des céréales (l'épi se transforme en une masse noire poudreuse).
	- <i>Rhizoctonia</i> - <i>Sclerotium</i> - <i>Armillaria</i>	S'attaquent aux racines et à la base des tiges des plantes.
	- <i>Puccinia</i> - <i>Uromyces</i> - <i>Hemileia</i>	Agents de rouilles, attaquent principalement les feuilles et les tiges et provoquent l'apparition de pustules (urédosores) contenant les spores (urédospores). Les rouilles ont généralement un cycle dioïque (se développent sur deux hôtes).

3.4.2. Les maladies causées par des bactéries

3.4.2.1. Caractéristiques des bactéries phytopathogènes

Les bactéries (*Bacteria*), sont des organismes microscopiques, unicellulaires dont les dimensions sont de l'ordre d'un micromètre. Ce sont des procaryotes caractérisés par l'absence de membrane nucléaire, et sont capables de réaliser des réactions métaboliques complexes.

Les bactéries se rencontrent dans tous les types de biotopes rencontrés sur la terre. Elles peuvent être isolées du sol, des eaux douces, de l'air, des profondeurs océaniques, des déchets radioactifs, de la croûte terrestre, sur la peau et de l'intestin des animaux. Il y a environ 40 millions de cellules bactériennes dans un gramme de sol et 1 million de cellules bactériennes dans un millilitre d'eau douce.

- Morphologie et structure

Les bactéries phytopathogènes sont des cellules qui se présentent en forme de bâtonnets (bacilles) à l'exception du genre *Streptomyces*, elles sont filamenteuses, de taille variant de 0.6 à 3.5 µm de longueur et de 0.3 à 0.7 µm de largeur (taille 10 à 20 fois inférieure à celle d'une cellule végétale typique).

Deux catégories d'éléments entrent dans la structure bactérienne (Fig. 02) :

a. Eléments constants obligatoires

- Le cytoplasme et inclusions cytoplasmiques (ribosomes)
- Le génome (porteur du patrimoine génétique)
- La membrane cytoplasmique, composée essentiellement de lipides et de protéines et contient plusieurs enzymes digestives et de phosphorylation (phosphatase acide, lipases, nitrate réductase, protéases, ...).
- La paroi bactérienne, rigide, perméable aux solutions minérales et organiques, sa composition chimique et variable selon les espèces et elle joue un rôle dans les processus de reconnaissance qui déterminent la relation parasitaire.

b. Eléments facultatifs

- La capsule : couche gélatineuse plus ou moins épaisse, composée de polysaccharides, enveloppant la paroi et a un rôle important dans la virulence.
- Les flagelles, structures de motilité de certaines cellules bactériennes, composés d'une protéine pure (flagelline). Le nombre et le type d'insertion des flagelles est caractéristique des différents groupes bactériens.
- Les plasmides : fragments d'ADN libres dans le cytoplasme, porteurs d'informations génétiques transférables d'une cellule bactérienne à l'autre (gènes de résistance aux antibiotiques).
- Les pili : filaments ou appendices filamenteux (les pili sexuels conditionnent les transferts génétiques lors de la conjugaison bactérienne).

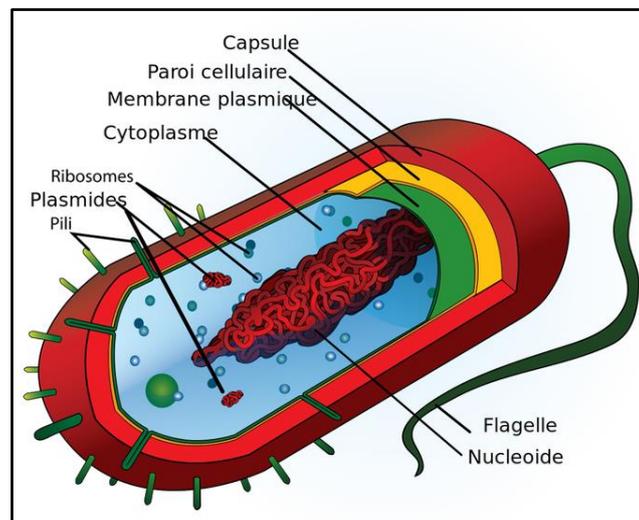


Figure 02: Structure générale d'une bactérie (<https://www.antibiotique.eu/leur-fonctionnement.html>)

- Nutrition

La nutrition des bactéries se fait par échange d'éléments minéraux ou organiques avec le milieu extérieur : rôle de la paroi bactérienne et de la membrane cytoplasmique.

- Respiration

La cellule bactérienne a une respiration membranaire (au niveau de la membrane cytoplasmique). Le type respiratoire diffère selon les genres (bactéries aérobies ou anaérobies).

- Reproduction

Les bactéries phytopathogènes ne sporulent pas, leur reproduction se fait par processus asexué connu sous le nom de *fission binaire* ou *scissiparité*. Le taux de reproduction est rapide en conditions optimales (température, pH, et composition du milieu). La courbe de croissance renferme plusieurs phases : latence, croissance exponentielle, croissance maximale, décroissance et survie.

- Ecologie et dissémination des bactéries phytopathogènes

Les bactéries phytopathogènes peuvent être :

- Des parasites facultatifs ou partiellement saprophytes (*Agrobacterium tumefaciens*, *Pseudomonas solanacearum*, et autres).
- Des bactéries qui pénètrent dans l'hôte par les voies naturelles ou les blessures.
- Des bactéries à localisation extracellulaire (meats) ou intracellulaire.
- Des bactéries dont la transmission est assurée par les semences et les organes de multiplication végétative (bulbes, tubercules, boutures,...).
- Des bactéries dont la dissémination est assurée par divers agents : eau (irrigation), pluie, vent, insectes, homme (outils et techniques culturales).

3.4.2.2. Principaux genres de bactéries phytopathogènes

Le [tableau 12](#) résume les principaux genres de bactéries phytopathogènes et leurs symptômes caractéristiques.

Tableau 12 : Principaux genres de Bactéries phytopathogènes et leurs symptômes caractéristiques

Genres		Maladies (symptômes)
<i>Corynebacterium</i> (Gram +)		Provoquent chez les végétaux divers types de symptômes tels que des galles, fasciations, gommoses ou dépérissement. La plupart des <i>Corynebacterium</i> phytopathogènes peuvent être transmises par la graine ou par les insectes et produisent des infections systémiques.
<i>Erwinia</i> (Gram -) (03 groupes sont phytopathogènes)	<i>carotovora</i> (<i>E. carotovora</i>)	Possèdent de fortes activités pectolytiques et induisent chez les plantes infectées une dégradation de la structure des tissus conduisant à des symptômes de pourriture humide, notamment au niveau des organes de réserve.
	<i>herbicola</i> (<i>E. herbicola</i>)	Espèces qui produisent un pigment jaune et sont associées aux plantes en tant qu'épiphytes non pathogènes ou comme parasites de faiblesse. Certaines d'entre-elles produisent des infections vasculaires et des galles.
	<i>amylovora</i> (<i>E. amylovora</i>)	Provoquent chez les plantes des nécroses sèches et des flétrissements; ne produisent ni enzymes pectolytiques ni pigments jaunes : « feu bactérien », chancre de l'écorce, galles,...
<i>Xanthomonas</i> (Gram -)		Cinq espèces distinctes constituent ce groupe : <i>X. albilineans</i> , <i>X. ampelina</i> , <i>X. axonopodis</i> , <i>X. campestris</i> et <i>X. fragariae</i> . Elles sont toutes phytopathogènes. Les symptômes se manifestent sur les feuilles, les tiges et les fruits (nécroses, taches d'huiles, gommoses, chancres, ...). Si l'infection est transmise par la graine, la maladie est systémique et la plante est détruite avant d'avoir atteint sa maturité.
<i>Pseudomonas</i> (Gram -)		Il existe deux groupes de bactéries <i>Pseudomonas sp.</i> : - <i>Pseudomonas</i> dits « fluorescents » dont les espèces phytopathogènes provoquent des nécroses sur les feuilles et les tiges, des chancres, des destructions des fleurs, des galles (<i>P. syringae</i> , <i>P. viridiflava</i> , <i>P. marginalis</i> ,...). - <i>Pseudomonas</i> dits « non fluorescents », c'est des agents de taches foliaires, certaines espèces sont des parasites vasculaires responsables de flétrissements, de pourritures de bulbes en conservation (<i>P. solanacearum</i> , <i>P. amygdali</i> , <i>P. andropogonis</i> , ...).

<p><i>Agrobacterium</i> (Gram -)</p>	<p>Certaines espèces provoquent le développement de galles ou tumeurs sur les tiges, les racines et le collet, d'autres induisent la prolifération des racines.</p> <p>Toutes les espèces dicotylédones peuvent être infectées par des souches de ce genre. Ces bactéries provoquent une « colonisation génétique » : le pathogène introduit dans les cellules de l'hôte un nouveau fragment d'ADN appelé <i>T. DNA</i> situé sur un plasmide spécifique appelé <i>Ti</i> ou <i>Ri</i>, qui induit la synthèse par les cellules transformées d'hormones (auxines, cytokinines) ainsi que d'acides aminés particuliers (opines) qui n'existent pas chez les végétaux, et que la bactérie utilise comme source de carbone et d'azote. L'excès d'hormones entraîne la prolifération cellulaire, conduisant à la formation de tumeurs.</p>
<p><i>Streptomyces</i> (Gram +)</p>	<p>Plusieurs espèces de ce genre sont phytopathogènes et provoquent la formation de pustules subéreuses au niveau de l'épiderme des organes de réserve se trouvant dans le sol. (<i>S. scabies</i> : agent de galles chez la pomme de terre).</p>

3.4.3. Les maladies causées par des virus

3.4.3.1. Caractéristiques des virus phytopathogènes

Les virus sont des particules complexes invisibles au microscope photonique, et ne peuvent pas être cultivés sur un milieu artificiel : ce sont des parasites obligatoires ne se multipliant que sur des cellules vivantes. Ils sont constitués de protéines et d'acide nucléique : ce sont de nucléoprotéines qui engendrent des maladies.

Les virus s'attaquent à toutes les formes de végétaux et endommagent aussi bien les tiges, les feuilles que les fleurs et les fruits.

Il existe 1 200 espèces de virus de plantes, ou « phytovirus », répartis en une quarantaine de familles. Les maladies provoquées par les virus peuvent avoir de graves incidences économiques (pour l'industrie agroalimentaire, la production de plantes ornementales, ...) et écologiques.

■ Morphologie

Les virus se présentent en particules virales de tailles et de formes diverses :

- Forme hélicoïdale : Virus de la mosaïque du tabac (TMV).

- Forme icosaédrale : où l'acide nucléique est pelotonné à l'intérieur de la capsid : virus de la mosaïque du concombre.
- Structure complexe : phage T (une tête et une queue).

■ Structure

- La particule virale est une nucléoprotéine constituée essentiellement d'une protéine et d'un acide nucléique. Deux types de constituants caractérisent les particules virales :

a- **Composants essentiels** : existent chez tous les virus :

- L'acide nucléique : les acides nucléiques des virus phytopathogènes sont tous des ARN sauf quelques exceptions.
- Les protéines : leur nombre est limité et elles constituent la coque ou la capsid du virus.

b- **Composants additionnels** : Certains virus possèdent une enveloppe supplémentaire de même nature que la membrane plasmique.

- La particule virale ne comporte qu'un seul type d'acide nucléique (généralement l'ARN).
- L'acide nucléique peut être simple brin ou double brin.
- Le message génétique est contenu dans l'acide nucléique qui est la partie infectieuse de la particule. C'est lui qui gouverne la multiplication virale.
- L'acide nucléique et les protéines sont produits séparément au sein de la cellule de l'hôte, puis se combinent en un site précis pour former la nucléoprotéine virale complète.
- La protéine est considérée comme enveloppe protectrice de l'acide nucléique.

■ Caractéristiques pathologiques

Les virus des plantes présentent trois caractéristiques principales qu'il faut connaître pour bien comprendre leur biologie :

- Les virus des plantes provoquent le plus souvent des maladies généralisées. Ils infectent presque tous les organes d'une plante : ils se multiplient aussi bien dans les racines que dans les tiges ou les feuilles. Seuls, certains massifs cellulaires en cours de différenciation, les méristèmes peuvent être indemnes de virus.

- Les maladies à virus sont incurables au champ : une plante infectée par un virus le restera toute sa vie, qu'elle soit annuelle ou pérenne.

- Comme tous les autres virus, les virus des plantes sont des parasites obligatoires : ils ne peuvent se multiplier que dans des plantes ou des organes végétaux vivants.

■ Fonctions biologiques et synthèse des virus

L'infection d'une plante par un virus ne se fait que lorsque celui-ci se multiplie dans la cellule hôte. A la suite du contact entre le cytoplasme et le virus, l'infection se fait en plusieurs étapes (Fig. 03), qui se résument comme suit :

- **Etape 01** : pénétration du virus à l'intérieur de la plante
- **Etape 02** : décapsidation du virus et dissociation de la capsidie dans le cytoplasme.
- **Etape 03** : synthèse dans la cellule hôte d'enzymes nécessaires à la synthèse virale : ARN synthétases, ARN polymérase, copie en série du génome virale et des protéines de la capsidie.
- **Etape 04** : auto-assemblage des parties des nouveaux virions.
- **Etape 05** : mouvement et propagation des virus dans les autres cellules de la plante infectée.

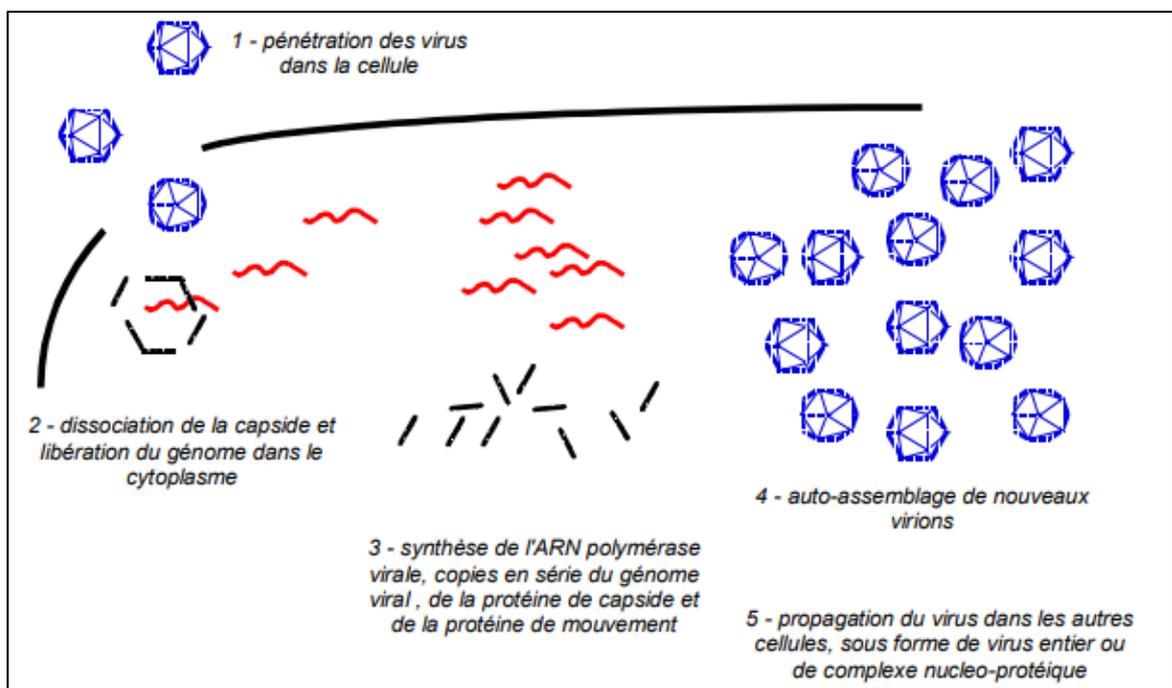


Figure 03 : Mécanismes d'infection des phytovirus
(in Casselyn, 2004)

■ Symptômes provoqués par les phytovirus

Les symptômes provoqués par les virus chez les plantes peuvent varier, selon le virus, la variété ou l'espèce atteinte, l'environnement et l'état physiologique dans lequel se trouvent les plantes :

- De nombreux virus provoquent sur le feuillage des symptômes de mosaïque parfois associée à des déformations (cloques, aspect filiforme ou gaufré, réduction de taille).
- D'autres maladies virales provoquent des jaunissements du feuillage, souvent plus marqués sur les feuilles âgées.
- Certains virus induisent des nécroses plus ou moins généralisées sur les feuilles, les fleurs, les fruits ou les tiges ; ces nécroses entraînent parfois un dépérissement de la plante.

D'une manière générale, les maladies virales réduisent la croissance et donc le potentiel global de production d'une plante, mais dans le cas des fruits et des légumes elles peuvent aussi altérer l'aspect et donc la qualité commerciale de la récolte.

■ Dissémination des virus

Les virus des plantes disposent de deux principaux moyens de dissémination dans la nature, une transmission dite verticale et une transmission dite horizontale :

- **La transmission verticale (Sans vecteurs)**: correspond à la transmission du virus à la descendance d'une plante infectée, elle comprend :

***Transmission par les organes de multiplication végétative** : Elle est très fréquente chez les plantes à multiplication végétative. Tous les organes de multiplications (boutures, greffons, tubercules, bulbes...) prélevés sur une plante-mère virosée seront infectés, car les virus provoquent des maladies généralisées. Ainsi, une pomme de terre infectée par le virus Y de la pomme de terre (*Potato virus Y*, PVY), produira des tubercules qui seront tous porteurs du PVY. Si ces tubercules sont plantés, ils donneront tous naissance à des plantes qui seront infectées par le PVY.

* **Transmission par la semence et le pollen** : le nombre de virus transmissibles par le pollen ou la semence provenant de pieds-mère infectés est très limité. Quelques rares virus de plantes pérennes peuvent être transmis par le pollen. Le pollen produit par une plante virosée pourra être disséminé par le vent ou par un insecte pollinisateur et venir

féconder une fleur sur une plante saine. En germant, le grain de pollen transmettra le virus à la plante saine.

Dans la grande majorité des cas, les virus ne sont pas transmis par les graines, mais malheureusement, cette règle admet des exceptions et certains virus économiquement importants peuvent être transmis par la graine comme le virus de la mosaïque de la tomate (*Tomato mosaic virus*, ToMV) ou le virus de la mosaïque de la laitue (*Lettuce mosaic virus*, LMV) .

* **Inoculation artificielle** : s'effectue généralement en mettant l'inoculum au contact de blessures de l'hôte.

* **Transmission par greffage** : tous les virus systémiques, peuvent être transmissibles par greffage à une plante compatible avec l'hôte virosé.

- **La transmission horizontale (avec vecteurs)** : permet aux virus de passer d'une plante à une autre et fait intervenir des 'intermédiaires' qui sont appelés les vecteurs de virus. Un vecteur de virus doit être capable de prélever (acquérir) le virus dans une cellule d'une plante malade et de l'introduire (inoculer) dans une cellule d'une plante saine. Ces vecteurs sont très variés, certains sont aériens (insectes, acariens) alors que d'autres se déplacent dans le sol (nématodes, champignons) :

* **Transmission par les insectes** : c'est la voie la plus commune. Les vecteurs les plus importants sont des insectes piqueurs-suceurs (pucerons, aleurodes, cicadelles...). Le puceron *Myzus persicae* véhicule lui seul environ 50 virus différents.

***Transmission avec d'autres vecteurs** : les nématodes et les champignons (se trouvant dans le sol) ainsi que les phanérogames parasites des plantes supérieures (cuscute) peuvent aussi entraîner la transmission des phytovirus.

Le plus souvent un virus donné n'est transmis que par un seul type de vecteur. Cette relation étroite entre le virus et son vecteur est due à des phénomènes de reconnaissance moléculaire très spécifiques.

La nature du vecteur (et en particulier sa mobilité), le type de relation entre le virus et le vecteur et la sensibilité de la culture sont des facteurs qui influent sur la vitesse de dissémination d'un virus dans une culture et donc sur la gravité des épidémies virales. Ainsi, un virus comme le CMV, qui est transmis par les pucerons (dont les ailés se déplacent facilement) pourra infecter toutes les plantes d'une parcelle de melon en quelques semaines. Par contre, le virus des taches en anneaux

de la tomate (*Tomato ringspot virus*, ToRSV) qui est transmis par nématodes ne se disséminera que de quelques mètres par an dans une parcelle.

3.4.3.2. Principaux genres de virus phytopathogènes

Le [tableau 13](#), indique quelques groupes de virus phytopathogènes et leurs symptômes caractéristiques :

Tableau 13 : Principaux groupes de virus phytopathogènes et leurs symptômes caractéristiques

Groupe	Virus type	Transmission	Symptômes
Tobamovirus	Virus de la mosaïque du tabac	- Mécanique - Contact	Mosaïque
Potexvirus	Virus X de la pomme de terre	- Mécanique - Contact	Mosaïque
Carlavirus	Virus latent de l'œillet	- Mécanique - Contact	Mosaïque
Potyvirus	Virus Y de la pomme de terre	- Mécanique - Pucerons - Semence	Mosaïque
Closterovirus	Virus de la jaunisse de la betterave	- Mécanique - Pucerons	Jaunisses, nécroses du phloème.
Tymovirus	Virus de la mosaïque jaune du navet	- Mécanique - Coléoptères	Mosaïque, Nécroses
Luteovirus	Virus de la jaunisse nanisante de l'orge (BYDV)	- Pucerons	Durcissement, jaunissement et enroulement des feuilles
Tombusvirus	Virus du rabougrissement de la tomate	- Mécanique	Port érigé
Nepovirus	Virus des anneaux nécrotiques du tabac	- Mécanique - Nématodes - Semence - Pollen	Taches annulaires, marbrures, nécroses.
Hordeivirus	Virus de la mosaïque striée de l'orge	- Semence - Pollen	Striures, nécroses
Cucumovirus	Virus de la mosaïque du concombre	- Mécanique - Pucerons	Mosaïque, nécroses
Caulimovirus	Virus de la mosaïque du chou-fleur	- Mécanique - Pucerons	Mosaïque
Rhabdovirus	Virus de la jaunisse nécrotique de la laitue	- Mécanique - Pucerons	Nécroses, jaunissement, nanisme
Virus du nanisme chlorotique du maïs	Virus du nanisme chlorotique du maïs	- Mécanique - Pucerons	Jaunissement, nanisme

3.4.4. Les nématodes phytophages

3.4.4.1. Définition

Les nématodes (Nématelminthes) ou "vers ronds", forment un groupe zoologique d'organismes vermiformes. Ils sont ubiquistes (toutes latitudes et tous climats) en ayant colonisé tous les types de milieux : les eaux continentales et océaniques (salées et douces) et les sols. Certains d'entre eux se sont adaptés à la vie parasitaire chez l'homme, les animaux et les végétaux.

Les nématodes sont des animaux vermiformes, les plus souvent microscopiques. On les retrouve dans pratiquement tous les milieux, à la fois sous forme de parasites ou d'organismes libres. Les nématodes parasites des plantes (ou phytoparasites), sont très petits, voire microscopiques. Les nématodes parasites de plantes comptent plus de 4100 espèces, dont au moins un nématode parasite connu pour les plus grandes cultures. Les nématodes phytopathogènes se répartissent dans 3 groupes, qui se séparent dans 4 ordres différents :

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

3.4.4.2. Importance économique et dégâts

Les problèmes phytosanitaires causés par ces ravageurs ont une incidence économique très importante à l'échelle mondiale, car ils s'attaquent aussi bien aux grandes cultures qu'aux cultures maraîchères, florales et fruitières. Ils sont responsables de pertes économiques estimées à 157 milliards \$US chaque année.

Les plus dommageables sont les Heteroderidae, incluant les nématodes du genre *Globodera* spp., *Heterodera* spp. et *Meloidogyne* spp. En Europe, ils sont responsables de dégâts atteignant 10% de la production céréalière et entraînent des diminutions de récoltes de 20 à 30% dans les vergers d'agrumes méditerranéens. Les dommages qu'ils provoquent aux USA représentent annuellement 6 milliards de dollars. Dans les régions tropicales et tempérées chaudes, très favorables à leur développement, ils constituent l'un des principaux ennemis des plantations et cultures de Caféier, Cotonnier, Bananier, Ananas, Maïs, Sorgho, etc., bases principales du développement de ces pays. En Australie, les nématodes sont responsables de 60 % de pertes chez le blé dans les parcelles infestées.

En Algérie, les résultats d'une enquête réalisée sur 5 années (2007-2012) ont montré que plus de 62 % des parcelles céréalières sont infestées par les nématodes.

L'importance des dégâts causés par les nématodes dépend d'un grand nombre de facteurs, comme leur nombre, la virulence de l'espèce ou de la souche, la résistance ou la tolérance de la plante hôte. D'autres facteurs sont également aggravants comme le climat, la disponibilité en eau, le type de sol, et la présence d'autres maladies et ravageurs.

3.4.4.3. Morphologie et structure des nématodes

Les nématodes phytoparasites sont le plus souvent des vers ronds en forme d'aiguille de taille variant de 0,25 à plus de 1 mm, certains atteignant 4 mm. Bien que généralement de forme effilée de la tête et à la queue, les nématodes existent avec une très grande variabilité de formes et de tailles. Chez quelques espèces, les femelles perdent leur forme effilée au fur et à mesure de leur croissance, jusqu'à devenir des femelles adultes élargies, en forme de poire, de citron, de rein ou sphériques. Comme les autres animaux, les nématodes possèdent des systèmes circulatoire, respiratoire et digestif (Fig. 04).

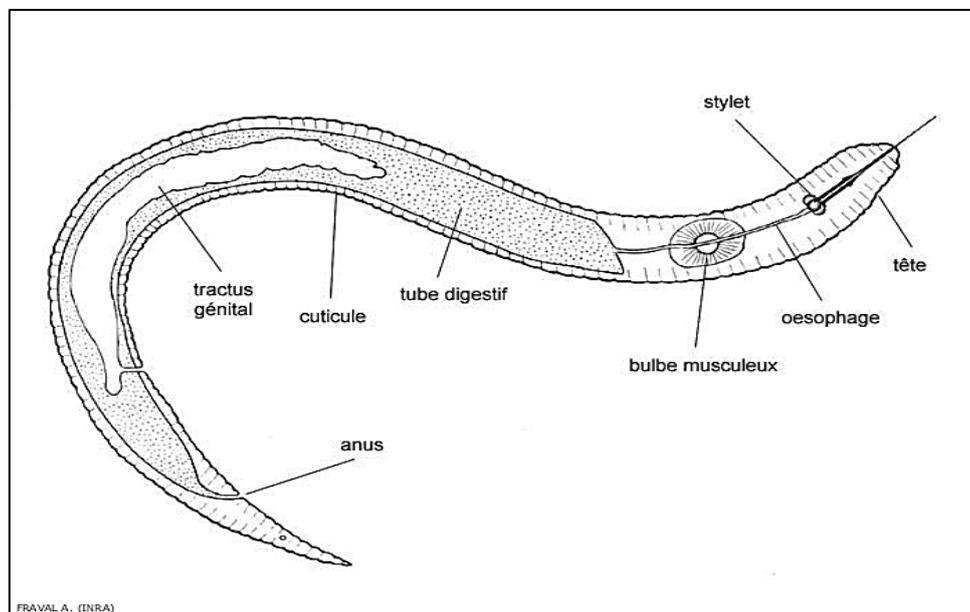


Figure 04 : Anatomie générale d'un nématode parasite

(<http://ephytia.inra.fr/fr/C/11096/Hypp-encyclopedie-en-protection-des-plantes-Nematodes-Nematoda>)

3.4.4.4. Nutrition des nématodes

Les nématodes phytoparasites diffèrent des autres nématodes qui s'alimentent sur des bactéries et des champignons par la présence d'une structure spécialisée : le stylet (Fig. 04). Ce stylet est utilisé à la fois pour injecter des enzymes dans les cellules et les tissus végétaux des plantes et pour en extraire le contenu, d'une manière très semblable aux aphidés (pucerons) sur les plantes.

3.4.4.5. Reproduction des nématodes phytoparasites

Il existe différents modes de reproduction chez les nématodes phytoparasites, et plusieurs modes de reproduction peuvent être rencontrés même au sein d'un même genre :

- **La reproduction amphimictique**: mode de reproduction sexuée qui implique la fusion d'un gamète mâle et d'un gamète femelle haploïde.

- **La reproduction parthénogénétique** : mode de reproduction asexuée, qui ne nécessite pas l'intervention des spermatozoïdes du mâle (pas de fécondation). Il existe 2 types de parthénogenèse :

- * **La parthénogenèse méiotique** : où la descendance n'est pas génétiquement identique à la mère (recombinaison après méiose).

- * **La parthénogenèse mitotique** : où tous les descendants sont génétiquement identiques à leur mère (reproduction clonale).

- **L'hermaphrodisme** : cas particulier de la reproduction bisexuelle. Un nématode hermaphrodite est auto-fertile, il produit des spermatozoïdes et des ovules en une seule gonade. Les spermatozoïdes sont d'abord produits et stockés pour fertiliser les gamètes qui sont produits par la suite.

3.4.4.6. Cycle biologique des nématodes

Le cycle de développement des nématodes est typiquement divisé en 6 : le stade oeuf, 4 stades juvéniles et le stade adulte. La durée de chacun de ces stades et du cycle biologique complet diffère selon les espèces et dépend de facteurs comme la température, la teneur en eau et la plante hôte. En conditions favorables, de nombreuses espèces ont des cycles de développement très courts avec plusieurs générations par saison. Cela peut conduire à des

développements très rapides de populations à partir de seulement un (auto-fertilisation) ou deux individus.

Les nématodes peuvent survivre à des conditions défavorables comme la saison sèche ou les hivers froids. Certaines espèces survivent mieux à différents stades, par exemple les espèces du genre *Heterodera* survivent mieux sous formes d'œufs à l'intérieur de kystes, le genre *Ditylenchus* au quatrième stade juvénile et le genre *Anguina* au second stade juvénile.

3.4.4.7. Différents types de nématodes phytoparasites

Les nématodes phytoparasites peuvent être séparés en deux groupes :

- **Les nématodes des parties aériennes** : s'alimentent sur les parties aériennes des plantes.
- **Les nématodes des parties racinaires** : s'alimentent sur les racines et tubercules souterrains.

Ils peuvent également être regroupés selon leur comportement alimentaire et leur mobilité en trois groupes principaux:

- **Endoparasites migrants** : des nématodes mobiles qui s'alimentent à l'intérieur des tissus racinaires des plantes. Chez ces nématodes, tous les stades sont mobiles à l'exception de l'œuf. Les nématodes traversent les tissus végétaux de cellule en cellule, ou peuvent quitter les tissus végétaux à la recherche de nouvelles sources alimentaires. Au cours de leur migration et de leur alimentation, ces nématodes pondent des œufs soit à l'intérieur du cortex racinaire soit dans le sol environnant les racines. Les cellules endommagées sécrètent des toxines qui peuvent tuer les cellules adjacentes, conduisant à la formation de petites tâches ou de lésions nécrotiques. Des champignons et des bactéries, agents de pourriture secondaire des racines, sont souvent associés aux déplacements et aux points d'entrée créés par les nématodes endoparasites migrants.

- **Endoparasites sédentaires** : des nématodes qui, arrivés sur un site nourricier, cessent d'être mobiles et s'alimentent sur ce site nourricier. Ils se déplacent dans le sol à la recherche de racines d'une plante hôte, traversent les tissus végétaux afin de trouver un site nourricier. Une fois le site trouvé, le juvénile s'y établit de manière permanente jusqu'à la fin de son cycle de développement en femelle adulte. Au fur et à mesure de son développement, son corps arrondi prend une forme sphérique, de citron, de rein ou ovoïde. Certaines espèces

(nématodes à kystes et nématodes à galles) conduisent à la formation de cellules géantes à l'intérieur des racines de la plante hôte.

Les mâles demeurent filiformes, se nourrissant à la surface des racines pour quelques jours, pendant lesquels ils peuvent ou non féconder les femelles avant de migrer à nouveau dans le sol pour y mourir.

Les femelles de nématodes endoparasites sédentaires produisent généralement un très grand nombre d'œufs, qui demeurent à l'intérieur de leurs corps (nématodes à kystes : *Heterodera* spp.) ou s'accumulent dans des masses d'œufs (nématodes à galles : *Meloidogyne* spp.) rattachées à leurs corps. Quelques autres espèces sont sédentaires mais seulement semi-endoparasites, comme le nématode réniforme (*Rotylenchulus* spp.) et le nématode des citrus (*Tylenchulus semipenetrans*), nématodes qui sont partiellement intégrés dans les tissus racinaires.

- **Ectoparasites** : Les nématodes ectoparasites s'alimentent de manière externe, à la surface des tissus racinaires des plantes, généralement sur les poils absorbants ou le tissu cortical externe des racines. On les retrouve souvent en très grand nombre sans que cela soit un problème. Cependant, ils peuvent occasionner de sérieux dommages aux plantes souffrant de stress d'origine biotique ou abiotique (attaque fongique ou faible disponibilité en eau). Les exemples de nématodes ectoparasites sont : les nématodes 'annelés' (*Criconemoides* spp.), les nématodes spiralés (*Helicotylenchus* spp.) et le nématode agent du bout blanc sur le riz (*Aphelenchoides besseyi*). Certains nématodes ectoparasites sont des agents importants de transmissions de virus aux plantes (*Xiphinema* spp.; *Longidorus* spp.; *Trichodorus* et *Paratrichodorus* spp.).

3.4.4.8. Symptômes d'attaques de nématodes

Les symptômes d'attaques de nématodes sont observables sur les parties aériennes comme sur les parties souterraines.

➤ 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*)
- Epaissements, 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*).

*** 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 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 (flétrissement de la plante, 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.

➤ Symptômes sur les parties souterraines

Certains symptômes dus aux nématodes 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 ces symptômes, qui 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.

3.4.4.9. Principaux genres de nématodes phytoparasites

Le [tableau 14](#) indique quelques genres de nématodes phytopathogènes et leurs symptômes caractéristiques.

Tableau 14 : Principaux genres de nématodes phytoparasites

Genres	Maladies (symptômes)
<i>Anguina</i>	S’attaque plus particulièrement aux céréales : l’espèce <i>A. tritici</i> provoque la nielle du blé. Les symptômes apparaissent à l’épiaison (feuilles déformées avec rabougrissement), des masses arrondies brunes remplacent les graines et renfermant un grand nombre de larves qui deviennent actives lorsque le grain niellé est humecté. Les graines niellées mélangées à la semence propagent la maladie.
<i>Ditylenchus</i>	Agent de pourritures des tubercules de pomme de terre.
<i>Meloidogyne</i>	Agents de galles, provoquent un rabougrissement et jaunissement de l’appareil aérien des plantes atteintes. De petites galles se forment au voisinage de la coiffe des racines, chacune renfermant une ou plusieurs femelles qui produisent un grand nombre d’œufs.
<i>Heterodera</i>	Agents de kystes. Pour l’espèce <i>H. avenae</i> qui s’attaque au blé, à l’avoine et au seigle, les racines des plantes atteintes ont l’aspect d’une touffe résultant d’une ramification excessive, il y a apparition de kystes bruns foncés attachés aux racines : ce sont les corps femelles transformés en sacs remplis de nombreux œufs.
<i>Aphelenchoïdes</i>	Provoquent des anomalies au niveau des feuilles et des bourgeons.
<i>Pratylenchus</i>	Agents de lésions et de pourritures.

Bibliographie

- **Agrios G. (2005).** Plant pathology. Academic press: 592p.
- **Ali N. (2016).** Communautés de nématodes phytoparasites associés à l'olivier : réponse aux forçages anthropiques et environnementaux. Thèse de Doctorat en Écologie, Evolution, Ressources Génétique, Paléobiologie (EERGP). SUP AGRO Montpellier. France : 334p.
- **Belaid D. (2017).** Les nématodes des céréales. Brochure agronomique : 18p.
- **Boumnich L. (2020).** Support de cours : Biologie des organismes végétaux : partie thallophytes. Université Moulay Ismaïl. Département de biologie : 26p.
- **Casselyn M. (2004).** Modifications structurales du Virus de la Mosaïque du Brome et interactions entre particules virales en solution : application à la cristallisation. Thèse de Doctorat en Biochimie. Université Pierre et Marie-Curie Paris 6 : 152p.
- **Combes C. ; Gavotte L. ; Moulia C. et Sicard M. (2018).** Parasitisme. Écologie et évolution des interactions durables. Ed. Dunod : 27p.
- **Corbaz R., (1990).** principes de phytopathologie et de lutte contre les maladies des plantes. Ed. Presses polytechniques et universitaires Romandes : 286 p.
- **Coyne D.L., Nicol J.M. et Claudius-Cole B. (2010).** Les nématodes des plantes: Un guide pratique des techniques de terrain et de laboratoire. Traduit par Quénéhervé P., Ed. Cimmyt, Mexico. : 93p.
- **Danan, S. (2009).** Diversité structurale des locus de résistance à *Phytophthora infestans* chez la pomme de terre et synténie chez les Solanacées. Thèse de Doctorat en Biologie interactive des plantes. SUP AGRO Montpellier, France : 302p.
- **Dubois E. (2019).** Les nématodes parasites des plantes: description, moyens de lutte et impact sur la faim dans le monde. Thèse de Doctorat en pharmacie. Université de Lille, France : 272p.
- **Kenaga C.B. (1974).** Principles of phytopathology. Ed. Waveland Press: 402 p.
- **Knudsen G. et Dandurand M.L., (2013).** Phytopathologie : l'étude de la santé des plantes. Université d'Idaho. Ed. Moscow, Idaho, États-Unis : 40p.
- **Lecellier A. (2013).** Caractérisation et identification des champignons filamenteux par spectroscopie vibrationnelle. Thèse de Doctorat en Biologie-Biophysique. Université de Reims : 196p.
- **Le coq H. (nd.).** Les virus des plantes, redoutables ennemis des cultures. Ed. INRA:5p
- **Lepoivre P. (2003).** Phytopathologie, Ed. De boeck : 428p.
- **Nasraoui B. (2006).** les champignons parasites des plantes cultivées. *biologie, systématique, pathologie, maladies* : pathologie (3^{ème} partie) Ed. OPU. Tunisie : 317-349.
- **Pernaci M. (2015).** Etude des traits d'histoire de vie de *Melampsora laricipopulina*, agent de la rouille du peuplier : de leur déterminisme génétique à leurs conséquences évolutives. Thèse de Doctorat biologie végétale et foresterie. Université Lorraine : 261p.
- **Petit Y. (2017).** Comprendre l'implication des effecteurs fongiques dans l'infection d'une plante hôte : caractérisation fonctionnelle d'effecteurs de *Leptosphaeria maculans*, champignon pathogène du colza. Thèse de Doctorat en sciences du végétal. Université Paris-Sud : 332p.

- **Prot J.C. (nd.)**. les nématodes des cultures maraichères. O.R.S.T.O.M. Dakar, Sénégal : 29p.
- **Sabeh M. (2019)**. Étude des déterminants génétiques de la pathogénicité chez les nématodes du genre *Globodera*. Thèse de Doctorat en sciences biologiques. Université de Montréal : 157p.
- **Semal J. (1989)**. Traité de pathologie végétale. Ed. les presses agronomiques de Gembloux : 622p.
- **Vincent M. (2017)**. Durabilité de la résistance et mécanisme de tolérance au virus y de la pomme de terre (PVY) chez *Nicotiana tabacum*. Thèse de Doctorat en Biologie Végétale. Université de Bordeaux : 275p.