



Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf
Faculté Des Sciences de la Nature et de la Vie



Département de Biotechnologie

Polycopié de cours

**Phytopathologie et protection des plantes médicinales
et aromatiques**

Master2

Spécialité : Biotechnologie végétale

Dr. HAOUHACH.Sadika

Année universitaire: 2022-2023

Intitulé de la matière : Phytopathologie et protection des plantes médicinales et aromatiques

Crédits : 06

Coefficients : 03

Objectifs de l'enseignement

Enseigner aux étudiants les maladies qui pourraient affecter les végétaux et les moyens de lutte.

Connaissances préalables recommandées.

Microbiologie, Biologie cellulaire ;

Contenu de la matière

- I. Principales maladies abiotiques et biotiques
 1. Symptomatologie
 2. Etiologie
 3. Pathogénèse
 4. Epidémiologie
- II. Principaux agents pathogènes
 1. Champignons
 2. *Bactéries*
 3. *Virus*
 4. Viroïdes
 5. Nématodes
- III. Physiologies des interactions plantes-pathogène
- IV. Principales méthodes de lutte
 1. Chimique
 2. physique
 3. Biologique
 4. Génétique

Autres : synthèse d'article, sortie sur terrain, exposés

Mode d'évaluation : Contrôle continu, examen

Table des matières

I-Principales maladies abiotiques et biotiques	7
1-Symptomatologie	7
1-1-Définition de maladies des plantes	7
1-2-Symptômes observés chez les plantes malades	7
1-2-1-Symptômes locaux	7
1-2-2-Symptômes systémiques	8
1-2-3-Symptômes primaires et secondaires	8
1-2-4-Symptômes microscopiques ou macroscopiques	8
1-2-4-1- Modifications de couleurs	8
1-2-4-2-Altérations d'organes	10
1-2-4-3- Modifications anatomiques	11
1-2-4-4-Anomalies sur les feuilles	14
1-2-4-5-Anomalies des fleurs	14
1-2-4-6-Anomalies de la croissance	12
1-2-4-7-Excroissances pathologiques	15
2-Etiologie	16
2-1- Maladies parasitaires	16
2-2-Maladies non parasitaires	16
3-Pathogénèse	14
4-Epidémiologie	19
4-1-Notions d'épidémiologie	19
4-2-Cycle d'une épidémie	20
4-3-Origine des épidémies	20
4-4-Phytopathométrie	21
II-Les gents pathogène	21
1-Les bactéries phytopathogènes	22
1-1-Conditions favorables à l'infection	22
1-2- Impacts sur l'agriculture	23
1-3- Classification	23
1-4-Symptomatologie des procaryotes phytopathogènes	24
1-5-Conservation et propagation des procaryotes phytopathogènes	26
1-6- Les principaux groupes des bactéries phytopathogènes	27
1-6-1- <i>Agrobacterium</i>	27
1-6-2- <i>Clavibacter (Corynebacterium)</i>	28
1-6-3- <i>Erwinia</i>	28
1-6-4- <i>Pseudomonas</i>	29
1-6-5- <i>Xanthomonas</i>	30
1-6-6- <i>Streptomyces</i>	30
1-6-7- <i>Xylella</i>	30
1-6-8- <i>Ralstonia</i>	30
2- Les champignons phytopathogènes	31
2-1-Définition	31
2-2-Morphologie de la cellule fongique	31

2-3- Structure mycélienne végétative	32
2-4- Mode de vie	33
2-5-Reproduction des champignons	34
2-6-Appareils sporifères des champignons	36
2-7- Classification des champignons phytopathogènes	38
2-7-1-Règne des Protozoa	39
2-7-2-Règne des Chromista	40
2-7-3-Règne des Eumycota	41
3-Agents subcellulaires	48
3-1 Viroïdes	48
3-2 Virus	49
3-2-1- Modes de dissémination des virus	50
3-2-2- Quelques exemples de maladies virales des plantes	51
4-Les maladies dues aux nématodes	52
4-1-Biologie des némates	52
4-2-Mode de reproduction	52
4-3-Relations avec l'hôte et dégâts occasionnés sur la plante	53
4-4-Symptômes d'attaques des nématodes	54
III-Interactions entre les plantes et les microorganismes	56
1-Interaction non-hôte	56
2-Interaction hôte	56
3-Les mécanismes moléculaires de la défense des plantes	58
3-1-Les défenses préformées	58
3-2-Les défenses inductibles	58
IV-Principales méthodes de lutte	60
1-Lutte chimique	60
1-1-Fongicides	60
1-2 Insecticides	61
2-Lutte physique	61
2-1- lutte thermique	62
2-2-Chocs mécaniques	62
3- Lutte pneumatique	63
4-Lutte biologique	62
4-1-Lutte biologique contre les insectes	62
4-2- Organismes entomopathogènes et nématophages	64
4-3- Produits à base de <i>Bacillus thuringiensis</i>	64
4-4- Baculovirus	65
4-5- Champignons entomopathogènes	65
4-6-Lutte biologique contre les microorganismes	66
4-6-1-Mécanismes d'action d'un agent de lutte biologique	66
4-6-2- Intérêt de la lutte biologique	66
5-lutte génétique	66
Références bibliographiques	

Liste des figures

Figure 1: Chlorose sur les feuilles d' haricots causée par <i>Fusarium oxysporum</i>	8
Figure 2: Mosaïque sur des feuilles de rosier	9
Figure 3: Dégâts d'antracnose sur feuilles et tige d'un agrume	9
Figure 4: Présence de mélanose sur les feuilles d'un agrume	9
Figure 5: Le feuillage blanc dépourvu de chlorophylle indiquant un albinisme	10
Figure 6 : Jaunissement, brunissement et dessèchement des feuilles d'aubergine	10
Figure 7: Plant de melon présentant des feuilles flétries ou desséchées	10
Figure 8: Aspect d'une pourriture sur feuille provoquée par <i>Sclerotinia minor</i>	11
Figure 9: Fasciation d'une tige de melon	11
Figure 10: Maladie du balai de sorcière	11
Figure 11: Chancre localisée sur l'écorce d'un arbre	12
Figure 12: Présence de nodule ligneux sur les branches d'un arbre	12
Figure 13: Polyphyllie des feuilles de tabac	13
Figure 14 : Feuille partiellement cloquée et déformée présentant une énation	13
Figure 15 : Plant de tomate <i>S. lycopersicum</i> présente des symptômes d'enroulements des feuilles.	13
Figure 16: Pièces florales présentant une Virescence	14
Figure 17: Malformation des parties florales ou inflorescences (phylloдие)	14
Figure 18: Des plants atteints de nanisme et présentent un tallage excessif	14
Figure 19: Présence d'excroissance pathologique (tumeur)	15
Figure 20: Présence d'excroissance sur la surface de feuille (Galle)	15
Figure 21 : Le triangle de la maladie	17
Figure 22 : Etapes du cycle infectieux standard d'un agent pathogène	18
Figure 23 : Schéma récapitulatif de la classification des bactéries phytopathogènes	22
Figure 24: Tumeur du collet du Framboisier par <i>Agrobacterium tumefaciens</i>	27
Figure 25: Tubercules infectés par une souche d' <i>Erwinia carotovora</i> ssp. <i>Atroseptica</i>	28
Figure 26: Exemples de symptôme causés par l'espèce <i>P. syringae</i>	29
Figure 27: Formes des thalles chez les champignons	32
Figure 28: Formation des différents types de spores asexuées	35
Figure 29: Reproduction sexuée et asexuée chez les champignons	36
Figure 30: Appareils sporifères d'origines sexués	37
Figure 31 : Appareils sporifères d'origines asexuées	38
Figure 32 : Schéma récapitulatif des champignons phytopathogènes	38
Figure 33: <i>Polymyxa betae</i> sur betterave transmet le virus BNYVV	39
Figure 34: <i>Plasmodiophora brassicae</i> sur racines de chou	40
Figure 35: Reproduction des oomycètes	41
Figure 36 : Cycle biologique des Chytridiomycètes	42
Figure 37: Cycle biologique des zygomycètes	43
Figure 38: Illustration des spores produites dans un sporange chez les zygomycètes	44
Figure 39: <i>Rhizopus stolonifer</i> parasite secondaire fructifiant sur concombre	44
Figure 40 : Les quatre principales morphologies ascomales ou sporocarpes	45
Figure 41 : Cycle de reproduction des ascomycètes	46
Figure 42: Cycle biologique des basidiomycètes	47
Figure 43: Stade de développement des basidiospores au sein d'une baside	47
Figure 44: Agent de la rouille de la fève (<i>Uromyces viciae-fabae</i>)	48
Figure 45 : Maladie de la rouille	48
Figure 46 : Virus de la mosaïque du rosier	50

Figure 47: Anatomie générale d'un nématode parasite	52
Figure 48: Symptômes provoqués par <i>Meloidogyne graminicola</i> sur plant de riz	55
Figure 49: Symptômes de nématodes à galles (<i>Meloidogyne sp.</i>) sur la betterave	55
Figure 50 : Représentation schématique du modèle gène-pour gène	57
Figure 51 : Modèle de défense en Zig-Zag	59

Introduction :

Le mot phytopathologie vient du grec phyto, qui signifie plante, pathos, qui signifie maladie et Logos qui signifie étude. La phytopathologie est l'étude des organismes et les facteurs de l'environnement qui causent les maladies des plantes.

Cette science appelée aussi phytiairie combine la connaissance de base de la botanique, mycologie, bactériologie, virologie, nématologie, anatomie et physiologie végétale, génétique, biologie moléculaire, génie génétique, biochimie, agronomie, science du sol, écologie et beaucoup d'autres branches de science.

À l'intérieur d'une pathologie végétale, on distingue souvent l'étiologie, qui étudie les causes des maladies, et l'épidémiologie, qui traite de leur développement.

I-Principales maladies abiotiques et biotiques

1-Symptomatologie

1-1-Définition de maladies des plantes

Une maladie de plante peut être définie par une succession de réponses invisibles et visibles des cellules et des tissus d'une plante, suite à l'attaque d'un micro-organisme ou à la modification d'un facteur environnemental ce qui provoquent des bouleversements de forme, de fonction ou d'intégrité de la plante. Ces réponses peuvent induire une altération partielle de certaines de ses parties ou bien à la mort de la plante.

1-2- Symptômes observés chez les plantes malades

Lors de l'infection d'une plante par un agent pathogène (biotique) ou par un changement environnemental (abiotique), la plante peut réagir à l'infection, on manifestant des symptômes généralement visibles.

Les symptômes peuvent être classés comme étant local ou systémique, primaire ou secondaire, et microscopique ou macroscopique.

1-2- 1- Symptômes locaux

Ce sont des changements physiologiques ou structurels au sein d'une zone limitée du tissu hôte infecté, tels que des tâches foliaires, des galles et des chancres.

1-2-2- Symptômes systémiques

Ils provoquent la réaction d'une plus grande partie voire la totalité de la plante, les exemples les plus fréquents des symptômes systémiques sont le flétrissement, le jaunissement et le nanisme.

1-2- 3- Symptômes primaires et secondaires

Les symptômes primaires sont directement responsable de l'anomalie observée (également appelé symptôme-cause), exemple des "clubs" gonflés dans l'hernie du chou et les "galles" formés par l'alimentation du nématode à galles). D'autre part, les symptômes secondaires résultent des effets physiologiques de la maladie sur les tissus éloignés et les organes non envahis (symptôme-conséquence), exemple, le flétrissement des feuilles des haricots qui tombent quand il fait chaud, résultant de Fusariose cf. pourriture des racines ou nématodes de nœud de la racine.

1-2- 4- Symptômes microscopiques ou macroscopiques

Dans les symptômes microscopiques, les expressions de la maladie se manifestent dans la structure de la cellule, peuvent être observés par microscopie (production de thylls, callose ...), à l'inverse des symptômes macroscopiques, ou les expressions de la maladie sur la surface des parties des plantes peuvent être vus à l'œil nu.

Les symptômes comportent essentiellement des changements de couleurs, des altérations d'organes, des modifications anatomiques, des productions anormales de substances et des altérations diverses du métabolisme:

1-2- 4- 1- Modifications de couleurs

Les anomalies de la coloration affectent surtout les feuilles, mais peuvent également concerner les fleurs, les fruits, les tiges et les racines.

Parmi les anomalies de coloration les plus fréquentes chez les plantes on peut citer :

-Chlorose: C'est le jaunissement ou le blanchiment des feuilles causé par une carence de la chlorophylle, ce symptôme peut se développer en raison de différentes maladies telles que la jaunisse fourasienne (*Fusarium*) de haricots (Figure1).



Figure1: Chlorose sur les feuilles d' haricots causée par *Fusarium oxysporum*
([www.clinique des plantes.fr/fiches/la-mosaïque-virale-du-rosier](http://www.clinique-des-plantes.fr/fiches/la-mosaïque-virale-du-rosier))

-Mosaïque: Elle se caractérise par une alternance de zones de coloration vert pâle ou vert foncé et des zones chlorotiques, ou jaunâtres (Figure 2).



Figure 2: Mosaïque sur des feuilles de rosier
[www.clinique des plantes.fr/fiches/la-mosaïque-virale-du-rosier](http://www.clinique-des-plantes.fr/fiches/la-mosaïque-virale-du-rosier)

-Anthocyanose : Excès de pigments rouge violacé résultant soit de la dégradation de la chlorophylle, soit de la production abondante d'anthocyanes (Figure 3).



Figure 3: Dégâts d'anthracnose sur feuilles et tige d'un agrume.
[https:// ephytia.inra.fr/fr/C/26531/Tropifruits-Anthracnose](https://ephytia.inra.fr/fr/C/26531/Tropifruits-Anthracnose)

-Mélanose : Elle correspond à une accumulation de substances foncées (mélanines) au niveau des tissus (Figure 4).



Figure 4: Présence de mélanose sur les feuilles d'un agrume.
[https:// plantix.net/fr/library/plant-diseases/100128/melanose](https://plantix.net/fr/library/plant-diseases/100128/melanose)

-Albinisme: Répression complète de couleur provoquée par des virus, des bactéries, des champignons et la carence en fer menant à l'albinisme qui donne le blanchiment des tissus foliaires (Figure 5).



Figure 5: Le feuillage blanc dépourvu de chlorophylle indiquant un albinisme
<https://blog.oleomac.fr/wp-content/uploads/2017/11/plante-albinos.jpg>

1-2-4-2- Altérations d'organes: Elles concernent aussi bien les feuilles, les tiges, les troncs ainsi que les fruits et causant les anomalies suivantes:

-Nécroses: Correspondent à la mort des cellules. Peut-être induit par des champignons, virus, bactéries (Figure 6).



Figure 6 : Jaunissement, brunissement et dessèchement des feuilles d'aubergine.
<http://ephytia.inra.fr/I/11918/Verti-aubergine-DB-241>

-Flétrissement : Perte de turgescence et un dysfonctionnement de la conduction du xylème (Figure 7).



Figure 7: Plant de melon dont de nombreuses feuilles sont flétries ou desséchées.
<http://ephytia.inra.fr/I/12586/phomop-melon-DB-201>

-Pourritures: Proviennent d'une décomposition des tissus à la suite de la dislocation des cellules provoquée par la dégradation enzymatique de la pectine des parois cellulaires (Figure 8).



Figure 8: Aspect d'une pourriture sur feuille provoquée par *Sclerotinia minor*.

<http://ephytia.inra.fr/fr/I/24726/Sclerotinia-minor1>

1-2- 4- 3-Modifications anatomiques:

Des modifications anatomiques peuvent être observées sur différents organes de la plantes rameaux, tiges, feuilles et au niveau de la croissance :

1-Anomalies des tiges et des rameaux:

- **Fasciation:** Elle consiste en une morphogénèse anormale des tiges qui s'aplatissent (Figure 9).



Figure 9: Fasciation de la tige de melon.

<http://ephytia.inra.fr/fr/I/13512/Fasciation2>

-**Blastomanie (Balais de sorcière) :** Elle correspond à une prolifération abondante de rameaux à entre-nœuds raccourcis et à feuilles petites, souvent déformées (Figure 10).



Figure 10: Maladie du balai de sorcière.

<http://www.apedibus.fr/~apedibus/images/sampled/fruitshop/BalaideSorciere.jpg>

- **Chancres (nécroses corticales)** : Ce sont des altérations localisées sur l'écorce des plantes ligneuses (Figure 11).



Figure 11: Chancre localisée sur l'écorce d'un arbre.
<http://www.florissant.fr/files/Planten/chancre%20plantes%20arbres%20haies.jpg>

-**Nodules ligneux**: Ils correspondent à des productions ligneuses en surface ou à l'intérieur de troncs ou de branches, ils se forment pour diverses raisons. Par exemple, une plante peut développer des nodules ligneux en réponse à une infection par un pathogène, comme une bactérie ou un champignon, dans le but de limiter la propagation de l'infection. Ils peuvent également se former à la suite de blessures et de stress environnemental (Figure 12).



Figure 12: Présence de nodule ligneux sur les branches d'un arbre.
<https://espacepouirlavie.ca/file/4962>

1-2- 4- 4- Anomalies sur les feuilles:

-**Polyphyllie**: Consiste en une subdivision du limbe de feuilles normalement simples, en un accroissement du nombre de folioles chez les feuilles composées, ou encore une augmentation anormale du nombre total de feuilles ; elle est liée à des troubles physiologiques ou parasitaires (Figure 13).



Figure 13: Polyphyllie des feuilles de tabac.
<http://ephytia.inra.fr/fr/I/18080/tabac212>

-Enations: Des excroissances tissulaires peuvent se former au niveau des nervures foliaires, généralement à la suite d'une infection virale (Figure 14).



Figure 14 : Feuille partiellement cloquée et déformée présentant une énation.
<http://ephytia.inra.fr/fr/I/12321/ZYMV-melon-DB-20>

-Anomalies diverses: A la suite d'infections parasitaires ou de traumatismes, les feuilles peuvent se présenter sous plusieurs aspects

-**Filiformes:** (réduction du limbe),

-**Enéventail, épaisses, enroulées vers le bas (Epinastie) ou vers le haut (Enroulement)** (Figure15).



Figure 15 : Plant de tomate *S. lycopersicum* présente des symptômes d'enroulement des feuilles.

1-2- 4- 5- Anomalies des fleurs:

-**Virescence:** Les pièces florales restent vertes (Figure16).



Figure 16: Pièces florales présentant une Virescence.
Seyyed-Alireza-E et al, 2015

-**Chloranthie ou Phyllodie:** Transformation de fleurs en structures foliacées (Figure 17).



Figure 17: Malformation des parties florales ou inflorescences (phyllodie).
https://www.terresinovia.fr/documents/20126/155997/Phyllodie_colza.jpg/09c9c0ee-36dd-97c1-5ef4-ed5e8f670863?t=1570522797158&imagePreview=1

1-2- 4- 6-Anomalies de la croissance:

-**Nanisme ou Atrophie:** Réduction de la taille de la plante ou de ses organes (Figure 18).



Figure 18: Des plants atteints de nanisme et présentent un tallage excessif
https://www.agrifind.fr/alertes/wp-content/uploads/2020/05/Maladies_Pieds-ch%C3%A9tifs_EcophytoPic.jpg

-Hypertrophie et Gigantisme: Croissance anormale de certains organes ou de la plante entière, suite à un accroissement des dimensions des cellules (Hypertrophie), ou suite à une multiplication anormale des cellules (Hyperplasie).

1-2- 4- 7- Excroissances pathologiques:

Tumeurs: Excroissances pathologiques à développement indéfini, et qui peuvent être d'origine parasitaire ou non parasitaire (résultat de la greffe de certaines espèces incompatibles) (Figure 19).



Figure 19: Présence d'excroissance pathologique (tumeur).

-Galle: Excroissances pathologiques à développement défini, et qui peuvent être provoquées chez les végétaux par des insectes, des champignons ou des bactéries (Figure 20).



Figure 20: Présence d'excroissance sur la surface de feuille (Galle).

2-Etiologie

L'étiologie est la discipline qui étudie les causes des maladies. En phytopathologie on distingue deux grands types de maladies (et de causes de celles-ci) chez les plantes :

2-1- Maladies parasitaires

Ce sont les maladies causées par l'action d'agents pathogènes (stress biotique), ces parasites sont généralement infectieux (ils envahissent l'hôte et s'y multiplient) et contagieux (ils se transmettent d'une plante infectée à une plante saine).

Les agents pathogènes responsables des maladies parasitaires (=diseases) ce sont des :

- Champignons phytopathogènes, incluant Eumycètes, ou Fungi, et Oomycètes;
- Bactéries phytopathogènes;
- Virus phytopathogènes;
- Nématodes phytopathogènes;
- Phytoplasmes (bactéries dépourvues de paroi), viroïdes, etc...

2-2-Maladies non parasitaires

L'étiologie des maladies non parasitaires (stress abiotique), résulte d'une inadéquation des conditions écologiques, Par exemple : sécheresse, gel, variation brusque de température, vent, grêle, rayons ultra-violets, manque (carence) ou excès (toxicité) en élément nutritif, manque (asphyxie) ou excès (suroxydation) d'oxygène, salinité excessive, présence de contaminants inorganiques comme les métaux et les métalloïdes lourds, présence de contaminants organiques comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les composés organochlorés, etc.

3-Pathogénèse

La maladie des plantes se manifeste par la présence de trois facteurs, leurs interactions forment ce qu'on appelle le « Triangle de la maladie » (Figure 21) et qui est constitué de :

- 1) Un hôte qui est susceptible (prédisposé) à devenir malade. Par exemple, certains champignons phytopathogènes attaquent seulement les jeunes racines et plants, ce qui rend les plantes âgées non susceptibles à la maladie.
- 2) Agent pathogène qui présente « l'agent causal », capable d'attaquer la plante.
- 3) l'interaction entre l'agent causal et la plante doit se produire dans un environnement qui est favorable (propice).

Le triangle de la maladie est un moyen qu'on peut utiliser pour découvrir des mesures de lutte contre la maladie, par l'élimination de l'une des trois côtés du triangle, nous pouvons éliminer ou réduire la maladie. Par exemple, pour un champignon pathogène, l'application d'un fongicide

peut tuer l'agent pathogène et éliminer le côté du triangle "pathogène virulent". Or, si nous plantons des cultures avec une résistance génétique à un agent pathogène («résistance» est le contraire de «susceptibilité»), nous pouvons éliminer ou réduire le côté du triangle de la maladie étiqueté «hôte sensible ».

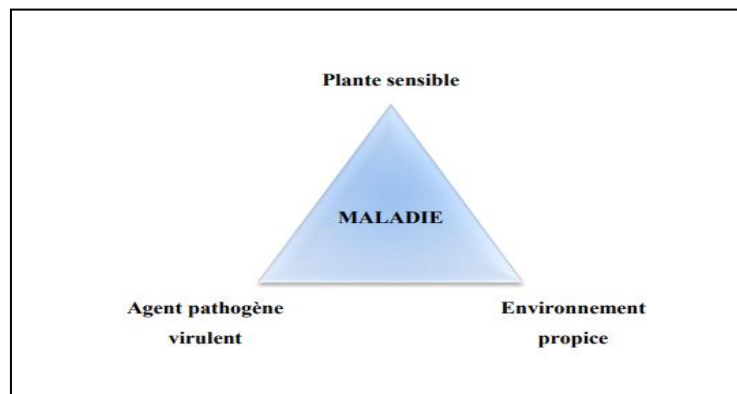


Figure 21 : Le triangle de la maladie, adapté d'Agrios (2005).

-Stades de développement d'une maladie

C'est la succession d'événements distincts qui conduit d'une part au développement de la maladie (cycle de la maladie) et de l'autre à la perpétuation du pathogène (cycle du pathogène).

Les principaux événements intervenant dans une maladie sont (Figure 22) :

1-Inoculation :

C'est la mise en contact de l'agent infectant ou inoculant avec la plante hôte sensible.

Toutes les parties du pathogène (spores, sclérotés ou fragments mycéliens) capables d'initier l'infection sont appelées inoculum. L'unité de cet inoculum est connue sous le nom de propagule. L'inoculum primaire provoque les premiers symptômes et l'inoculum secondaire conduit à la propagation de la maladie. L'inoculation du pathogène se fait par : libération des spores, dissémination des spores, aboutissement des spores sur la plante et germination des spores.

2-Pénétration :

Afin d'acquiescer les nutriments à partir de la plante hôte, les phytopathogènes doivent pénétrer dans le tissu, cette dernière se fait par deux voies:

a- Pénétration indirecte ou passive : se fait par les ouvertures naturelles, les blessures ou les vecteurs.

a-Pénétration directe ou active : elle peut être mécanique dans la plus part des cas ou facilitée par des enzymes (chez les champignons il y a formation d'un hyphes de pénétration = appressorium).

3- Infection :

C'est le processus pour lequel le pathogène établit le contact avec la cellule et les tissus sensibles des plantes de l'hôte (tirer les éléments nutritifs).il ya apparition de symptômes.

4-Période d'incubation :

Le temps qui s'écoule entre le contact et l'apparition des symptômes est décrit comme étant la période d'incubation. Cette période est variable, elle est de 6 jours pour le Mildiou et de 12 mois pour charbon nu ou la carie des céréales. Elle est aussi en fonction d'un nombre de paramètres (sensibilité de la plante, conditions du milieu soient favorables...).

5-Dissémination :

Les phytopathogènes sont généralement disséminées dans la nature par l'intermédiaire de divers agents comme le vent, la pluie, les insectes, les semences, outils de travail.....

6-Conservation :

Permet à l'agent pathogène de se conserver pendant des périodes allant d'un cycle végétatif à un autre et jusqu'à plusieurs années. Elle se fait par des organes de résistances comme des sclérotes, ou des chlamydo-spores chez les champignons, certains peuvent se conserver dans les outils de travail contaminés. Pour les virus, leurs conservations se fait uniquement dans les tissus vivants.

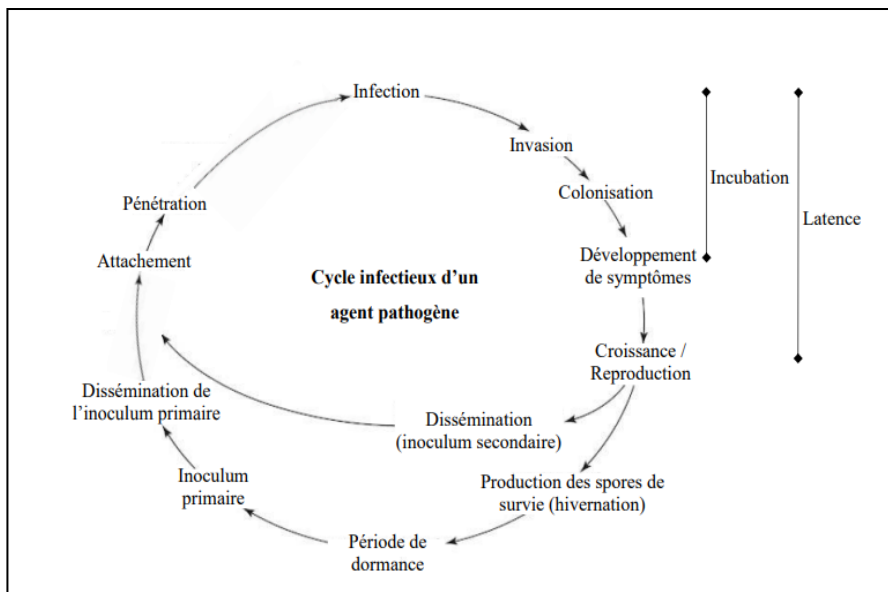


Figure 22 : Etapes du cycle infectieux standard d'un agent pathogène, adapté d'Agrios (2005).

4-Epidémiologie

4-1-Notions d'épidémiologie

Se définit comme l'étude du développement des maladies au sein des populations contaminées ou susceptibles de le devenir. Le suivi se fait en fonction du temps, de l'espace et des cultures. La connaissance de l'évolution de la maladie permet de prendre des mesures efficaces dans la lutte contre le pathogène.

Une épidémie est caractérisée par une très forte expansion de l'agent pathogène au sein d'une population sensible. Cette expansion implique une infection par un inoculum primaire, sa multiplication au cours de la maladie et la dissémination de l'inoculum nouvellement constitué.

Une épidémie peut évoluer au cours d'une année, et on l'appelle une épidémie monolytique ou bien elle prend plusieurs années pour se déclencher comme exemple le mildiou de la pomme de terre et une épidémie est dite épidémie polyétique causée généralement par une maladie due à des agents telluriques ou certaines maladies virales: PPX, tristeza.

Parmi les épidémies les plus spectaculaires qu'a connus l'humanité durant les siècles passés, on peut citer :

- l'épidémie causée par le mildiou de la pomme de terre déclaré en 1845 ayant dévasté toutes les cultures de pommes de terre qui a entraîné une famine importante et a causé la mort à des milliers de personnes en plus de la migration de milliers de familles.

- l'épidémie causée par l'helminthosporiose sur riz, qui a anéanti pratiquement toutes les productions de riz. qui a provoqué une famine de grande ampleur en 1942 connu sous le nom de la famine de Bengale. Elle a entraîné des milliers de morts et des migrations massives

- **Endémie**: Elle touche de faibles nombre individus avec une fréquence constante dans une région. Ceci ne veut pas dire qu'une endémie est caractérisée par un faible impact. Une maladie endémique peut constituer le foyer d'un déclenchement d'une épidémie.

- **Pandémie**: c'est une épidémie qui touche une très large population, de caractère continental ou mondial. Parmi des épidémies végétales de type pandémique on peut citer *phytophthora infestans*, *Xylella fastidiosa*, *puccinia striiformis*.

4-2-Cycle d'une épidémie :

Le déclenchement du cycle commence par la présence de l'inoculum qui est un élément vivant du parasite capable de contaminer une plante-hôte. Il peut provenir d'une dissémination du pathogène d'une autre région où il était présent à l'état endémique, conservé dans des débris végétaux ou sur des hôtes secondaires. L'inoculum primaire est responsable de la pollution de l'hôte et permet à la maladie d'exister. L'inoculum secondaire apparaît sur la population-hôte déjà contaminée et permet la dissémination de la maladie.

La maladie se développe sur les plantes contaminées par l'inoculum primaire avec ou sans phase de latence qui précède l'apparition des premiers symptômes. L'agent pathogène se développe aux dépens de son hôte, il y a parasitisme : infection.

La phase contagieuse du cycle débute lorsque le pathogène est libéré (ou transmis), ce qui permet sa dissémination dans le temps et l'espace : C'est l'inoculum secondaire.

La vitesse de la propagation d'une épidémie dépend de la vitesse de multiplication du pathogène qui dépend elle-même de la présence de réservoirs d'inoculum, sources de foyers primaires, les conditions climatiques, l'usage ou non de pesticides (et leur efficacité), l'état des plantes hôtes (carences, blessures, état parfait,..., leurs caractéristiques génétiques (résistances et tolérances).

4-3-Origine des épidémies

Lors d'une épidémie, l'équilibre naturel est rompu, la population du pathogène augmente brutalement, et la maladie se développe au sein d'une population de plante. Les ruptures d'équilibre peuvent avoir comme origine :

- (1) Une introduction d'un pathotype dans une région où les plantes ne possèdent pas de mécanismes de résistance,
- (2) L'apparition par mutation d'un nouveau pathotype ayant une virulence accrue,
- (3) La culture intensive d'un cultivar sensible à un pathogène (écosystèmes artificiels : systèmes culturels modernes).

4-4-Phytopathométrie

La quantification des maladies des plantes, également appelée phytopathométrie, vise à fournir des outils et des techniques pour évaluer l'ampleur des dommages causés aux plantes et pour aider à la prise de décisions en matière de gestion des maladies des cultures.

- Méthodes de quantification des maladies

a- Méthodes directes

La quantification des maladies est basée sur l'évaluation des symptômes et des signes. Parmi ces paramètres, on trouve :

- 1- Prévalence: C'est le taux de champs contaminés par une maladie par rapport au nombre de champs prospectés.
- 2- Incidence (fréquence) : C'est le taux de plantes ou organes infectés en fonction du nombre de plants totaux.
- 3- Détermination de l'aire sous la courbe (AUPC : area under the progress curve) : Elle représente la progression de l'incidence entre deux points.
- 4 - Sévérité (intensité) : C'est le taux de la zone de tissu atteinte selon les échelles de notation appropriées à chaque maladie.

b- Méthodes indirectes

Le recours à ces méthodes dans le cas où les symptômes typiques sur plants malades ne peuvent pas être observés ou sont difficilement mesurables (nanismes, gales, tumeurs, retard de croissance, manque de vigueur de la plante, etc....).

Parmi ces méthodes, on cite : Techniques de comptages, détermination de la distribution spatiale de la maladie, comparaison des rendements dans les parcelles exposées et non exposées.

II-Les agents pathogènes :

Avant d'envisager une lutte contre une maladie de plante, il est nécessaire d'identifier le pathogène responsable, de connaître son écologie, son cycle de développement, ses modes de dissémination et de maintien dans l'environnement.

1-Les bactéries phytopathogènes

Ce sont des organismes procaryotes sans noyau différencié (chromosome nu), sans mitochondries, avec un génome habituellement circulaire formé d'une DNA double hélice codant le plus souvent pour 1000 à 4000 gènes. On distingue les bactéries sensu stricto pourvus d'une paroi et les mollicutes (phytoplasmes ou spiroplasmales) qui sont dépourvus.

La plupart des bactéries se reproduisent par fission binaire ou scissiparité. Les bactéries se multiplient rapidement, ils peuvent produire un nombre considérable de cellules dans un temps court. Les maladies bactériennes des plantes sont présentes dans les environnements humides ou chauds, et ils affectent toutes les familles de plantes.

Elles peuvent infecter différentes parties des plantes, y compris les feuilles, les tiges, les racines, les fleurs ainsi que les fruits, entraînant des symptômes variés tels que : le dépérissement, pourritures, tumeurs, nécroses, chancres, flétrissements. Les bactéries utilisent différentes stratégies pour infecter les plantes. Certaines produisent des enzymes qui dégradent les tissus végétaux, facilitant ainsi leur pénétration. D'autres sécrètent des toxines qui endommagent les cellules végétales et suppriment la réponse immunitaire des plantes. Elles sont capables aussi de former des biofilms sur les surfaces des plantes, ce qui les protège et favorise leur colonisation.

Les **Mollicutes** sont des microorganismes procaryotes qui se caractérisent par leur absence de paroi cellulaire rigide.

Ils sont répartis en deux types :

- les phytoplasmes ou mycoplasma-like organisms (MLO) non cultivables pour l'instant.
- les spiroplasmales sont cultivable sur milieux nutritifs spécifiques.

Les mécanismes de pathogénèse sont très variés : synthèse de toxines (certaines Corynébactéries), d'antibiotiques, hormones et régulateurs de croissance (*Agrobacterium*, *Corynebacterium*), enzymes lytiques (pectate lyase et méthylestérases d'*Erwinia carotovora*), transfert d'ADN dans la cellule végétale (*Agrobacterium*).

Ces maladies se manifestent par des symptômes de jaunissement, de nanisme, de déformation des feuilles et de réduction de la croissance.

1-1-Conditions favorables à l'infection :

Les bactéries phytopathogènes ont des exigences spécifiques pour infecter les plantes. Cela peut inclure des conditions environnementales favorables telles que l'humidité, la température et le pH, ainsi que des conditions favorables à la pénétration des tissus végétaux, telles que des blessures, des pores stomatiques ou des ouvertures naturelles.

1-2- Impacts sur l'agriculture :

Les maladies causées par les bactéries phytopathogènes ont des conséquences économiques importantes dans l'agriculture. Elles peuvent réduire la production, entraîner des pertes de récoltes, altérer la qualité des produits, compromettre la santé des plantes et nécessiter l'utilisation de pesticides pour le contrôle.

Ces maladies se manifestent par des symptômes de jaunissement, de nanisme, de déformation des feuilles et de réduction de la croissance.

1-3- Classification

La classification moderne est basée sur les comparaisons de séquences nucléotidiques, les gènes qui codent pour les ARNr étant les plus utilisés pour différencier les taxons.

Les niveaux taxonomiques propres à la phytopathologie sont :

Espèce, Genre, Famille, Ordre, Classe, Règne et Domaine.

Cependant pour le phytopathologiste l'identification de l'espèce à elle seule est insuffisante, il faut connaître le **pathovar** de l'espèce.

Le pathovar de l'espèce : est l'entité montrant une spécificité parasitaire vis-à-vis d'une espèce hôte particulière.

Les pathovars sont subdivisés en biotypes ou races dont chacun n'attaque que certains cultivars d'une espèce végétale à l'exclusion des autres. Les bactéries phytopathogènes se trouvent toutes dans le domaine des Eubacteria.

Pour les **Eubacteria** la première subdivision est fondée sur la coloration de Gram (Figure 23).

- Au sein des bactéries Gram-, on trouve les proteobacteria, un groupe contenant 5 sections (α , β , γ , δ , ϵ) définies sur la base des séquences de l'ARN 16 S.
- Les Gram+ se définissent sur la base du contenu C+G.

GRAM +	GRAM -
Actinobacteria (% G+C élevé) Actinomycétales (ordre) Corynebacterium Frankia Streptomyces	Proteobacteria (alpha) (classe) Rhizobiales (ordre) Agrobacterium Bradyrhizobium Rhizobium Sinorhizobium Rickettsiales Rickettsie
Firmicutes (% G+C faible, phylum) Clostridia (classe) Clostridium	Proteobacteria (beta) (classe) Burkholdérales (ordre) Burkholderia Ralstonia
Mollicutes (classe, bactéries sans paroi) Phytoplasma Spiroplasma	Proteobacteria (gamma) (classe) Pseudomonadales (ordre) Pseudomonas Xanthomonadales (ordre) Xanthomonas Xylella Enterobactériales (ordre) Erwinia Escherichia
Bacilli (classe) Bacillus, Lactobacillus	
<p>En rouge, les genres contenant des espèces pathogènes de plantes, en vert les genres contenant des espèces symbiotiques de plantes, par exemple <i>Rhizobium</i> genre auquel appartiennent des espèces fixatrices d'azote.</p>	

Figure 23 : Schéma récapitulatif de la classification des bactéries phytopathogènes

La classification qui fait habituellement référence est celle du "Bergey's Manual of Systematic Bacteriology", qui a pour but de refléter la phylogénie des procaryotes est la suivante:

Regne: Procaryotae

Les bactéries avec membrane cytoplasmique et une paroi cellulaire.

➤ **Division: Gracilicutes:** bactéries Gram négative.

Classe: Proteobacteria : la plupart sont unicellulaire.

Famille: Enterobacteriaceae

Genre:

1-Erwinia, causant le feu bactérien de poirier et de pommier, le flétrissement Stewartii du Maïs et la pourriture molle de légumes charnus.

2-Pantoea, flétrissent du Maïs.

Famille: Pseudomonadaceae

Genre:

- 1- **Acidovorax**, provoquant des taches foliaires du maïs, des orchidées et la pastèque.
- 2- **Pseudomonas**, causant de nombreuses taches foliaires, des brûlures, des flétrissements vasculaires, pourritures molles, des chancres et des excroissances.
- 3- **Ralstonia**, provoquant le flétrissement des cultures de solanacées.
- 4- **Rhizobacter**, provoquant la galle bactérienne de la carotte.
- 5- **Rhizomonas**, provoquant la pourriture des racines liégeuses de laitue.
- 6- **Xanthomonas**, causant de nombreuses taches foliaires, les taches de fruits et les brûlures des plantes annuelles et vivaces, flétrissements vasculaires et le chancre des Agrumes.
- 7- **Xylophilus**, Provoquant la nécrose bactérienne et le chancre de la vigne.

Famille: Rhizobiaceae

Genre:

- 1- **Agrobacterium**, induit la maladie de la galle du collet (crown gall disease).
- 2- **Rhizobium**, cause la formation de nodules racinaires chez les légumineuses.

Famille: inconnu

- 1- *Xylella*, se trouvent au niveau du xylème qui provoque des maladies de brûlure des feuilles et dépérissement des arbres et de la vigne et isoler dernièrement sur l'olivier.
- 2- *Candidatus liberobacter*, habitant le phloème et causent la maladie greening des agrumes.

➤ **Division: Firmicutes** : Bactéries Gram positive

Classe: Firmibacteria : la plupart se sont des bactéries unicellulaires

Genre:

- 1- *Bacillus*, provoquant la pourriture des tubercules, des graines et des semis et la rayure blanche du blé.
- 2- *Clostridium*, provoquant la pourriture des tubercules de Pomme de terre stockées.

Classe: Thallobacteria: bactéries filamenteuses.

-Streptomyces, provoquant la gale commune de la Pomme de terre.

➤ **Division: Tenericutes**

Classe: Mollicutes : organismes dépourvus de la paroi cellulaire.

Famille : Spiroplasmataceae

Genre:

Spiroplasma, provoquant rabougrissement du Maïs et la maladie du stubborn des agrumes.

Famille : inconnu

Genre: Phytoplasma, causant de nombreuses maladies de jaunisses, de prolifération et de déclin des arbres et de certaines plantes annuelles.

1-4-Symptomatologie des procaryotes phytopathogènes:

Les bactéries pathogènes des plantes induisent des symptômes sur les plantes qu'ils infectent ces différents types de symptôme peuvent être causés par des bactéries pathogènes appartenant à plusieurs genres, et chaque genre peut contenir des agents pathogènes capables de provoquer différents types de maladies. Une même bactérie peut provoquer des symptômes différents sur différents organes.

Les principaux symptômes sont :

- Des nécroses : (ex : feu bactérien du tabac) ;
- Des jaunissements et des flétrissements par invasion des vaisseaux (ex : flétrissement bactérien du poivron) ;
- Des pourrissements sur les organes charnus (ex : jambe noire de la pomme de terre) ;
- Des proliférations et des tumeurs et fasciations (ex : galle du collet ou crown gall de nombreuses espèces fruitières).

Ces divers symptômes sont dus à la production par les bactéries de plusieurs types de substances : les auxines provoquent des tumeurs ou des déformations, les enzymes des pourritures, les toxines des nécroses, chloroses.

1-5-Conservation et propagation des procaryotes phytopathogènes

Les bactéries ne possèdent pas de formes de résistance qui permettraient leur conservation et leur dissémination. En revanche, d'autres formes de conservation ont été rapportées :

1- Les semences ainsi que le matériel végétal de multiplication constituent la principale source d'inoculum et de diffusion des maladies bactériennes. La capacité de survie des bactéries phytopathogènes sur les semences dépend de l'espèce bactérienne ainsi que de la plante hôte. Les *Xanthomonas*, à titre d'exemple, survivent généralement plus longtemps que les *Pseudomonas*:

- *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola* -Plante hôte : Haricot (longévité Max 3ans).
- *Xanthomonas campestris* pv. *phaseoli* - Plante hôte : Haricot (longévité max15ans).

2- Les bactéries phytopathogènes peuvent hiberner sur le matériel végétal en place surtout au niveau des affections chancreuses des tissus des végétaux ligneux. Ce phénomène est très remarquable dans le cas des arbres fruitiers tels que: *Erwinia amylovora* chez le poirier et le pommier.

3-La capacité des bactéries phytopathogènes à survivre dans les débris végétaux dépend essentiellement des conditions physico-chimiques, des compétitions et des antagonistes microbiens et des conditions climatiques.

4- Les insectes, essentiellement les pucerons, ainsi que les nématodes peuvent aussi jouer un rôle important dans la dissémination des maladies bactériennes des plantes.

1-6- Les principaux groupes des bactéries phytopathogènes

1-6-1- *Agrobacterium*

Les bactéries du genre *Agrobacterium* sont des espèces naturellement telluriques, plus particulièrement retrouvées dans les parties rhizosphériques (sol parcouru par des racines de plantes). Le genre *Agrobacterium* appartient à la famille des Rhizobiaceae dans la classe des alpha-protéobactéries. La famille **Rhizobiaceae** est capable d'induire la formation de nodosités permettant la fixation de l'azote atmosphérique chez ces plantes.

Agrobacterium est un genre de bactéries du phylum des Proteobacteria, plus spécifiquement de la classe des Alphaproteobacteria. Il comprend des bactéries du sol et des rhizobactéries qui ont la capacité de provoquer des infections chez les plantes.

Ex *Agrobacterium tumefaciens* l'agent du Crown gall disease ou broussin-tumeurs sur tige ou racine) (Figure 24). Cette maladie affecte principalement les plantes dicotylédones, telles que les arbres fruitiers, les légumes, les plantes ornementales, etc.

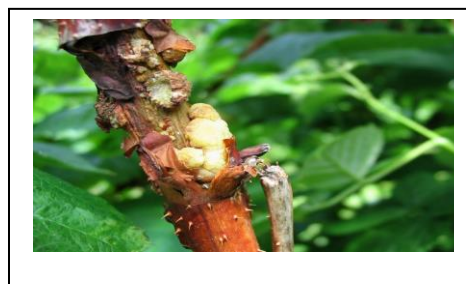


Figure 24: Tumeur du collet du Framboisier par *Agrobacterium tumefaciens*.

1-6-2- *Clavibacter* (*Corynebacterium*)

Sur le plan morphologique, ce genre est caractérisé comme étant des bacilles à Gram-positif, droits ou légèrement incurvés avec des renflements (poire ou massue) et quelquefois, des formes ramifiées. Les cellules bactériennes de ce groupe sont de taille variable entre 0,5 et 0,9 et entre 1,5 et 4 micromètres. Les bactéries sont généralement immobiles, mais certaines espèces sont mobiles

au moyen d'un ou deux flagelles polaires. (*Corynebacterium michiganense* [syn. *Clavibacter michiganensis*] causant le flétrissement bactérien de la tomate).

1-6-3-Erwinia

Elles sont mobiles grâce à la présence de flagelles disposés tout autour de la cellule bactérienne (péritriches). Elles sont capables de vivre dans un milieu aérobie ou anaérobie (anaérobies facultatifs) en présence d'eau libre, et se propagent rapidement. Le genre *Erwinia* appartient à la famille des Entérobactéries qui comprend plusieurs espèces phytopathogènes comme *E. amylovora*, *E. pyrifoliae*, *E. mallotivora*, *E. papayae*, *E. psidii*, *E. rhapontici*, ou épiphytes comme *E. billingiae*, *E. toletana*, *E. trachaeophila*, *E. aphidicola*, *E. persicina*, et *E. tasmaniensis* (dont le génome est séquencé) (Figure 25).



Figure 25: Tubercules infectés par une souche d'*Erwinia carotovora* ssp. *Atroseptica*.

(Yaganza, 2005).

(A) : suintement du tubercule qui favorise la dissémination de la maladie en entrepôt ; (B) : développement secondaire de moisissures ; (C) : chair du tubercule pourri ; (D) : sites d'infection

1-6-4- Pseudomonas

Le genre *Pseudomonas* constitue l'un des 8 genres bactériens phytopathogènes. Ce genre bactérien compte aujourd'hui de nombreuses espèces qui colonisent le sol, la rhizosphère, la Phyllosphère. Les *Pseudomonas* sont mobiles au moyen d'un ou nombreux flagelles polaires.

Il existe deux groupes de bactéries *Pseudomonas* sp. :

- **Pseudomonas** dits « fluorescents » dont les espèces phytopathogènes provoquent des nécroses sur les feuilles et les tiges, des chancres, des destructions des fleurs, des galls (*P. syringae* (Figure 26), *P. viridiflava*, *P. marginalis*,...).

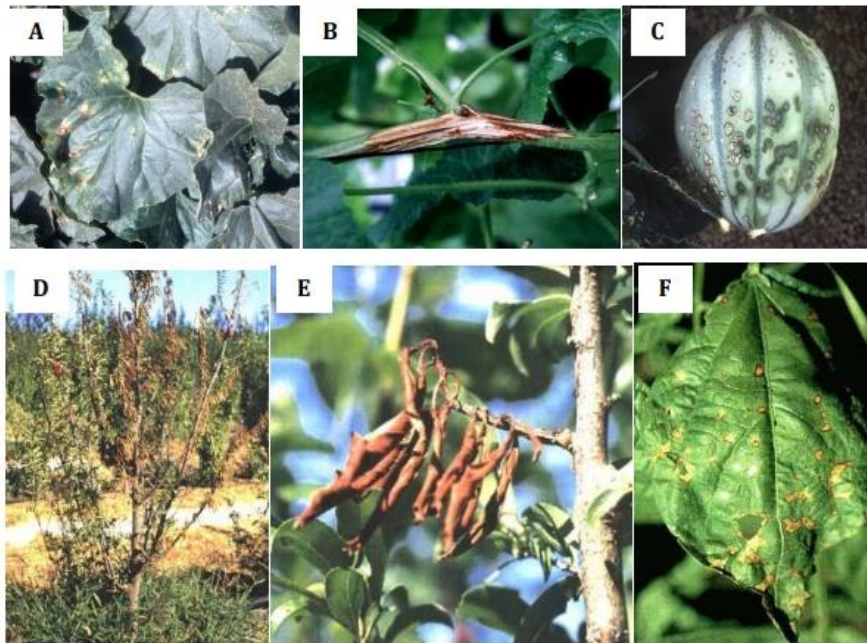


Figure 26: Exemples de symptôme causés par l'espèce *P. syringae* (A-C) Nécroses foliaires, sur tige et sur fruit causées par *P. syringae* pv. *apartata* sur melon (*Cucumis melo*) (INRA Avignon). (D-E) Feu bactérien et mort d'un prunier causés par *P. syringae* pv. *mosprunorum*, photos de Hattingh et al. (1989). (F) Nécroses foliaires sur haricot dues à *P. syringae* pv. *syringae* (Hirano et al. 1995).

- **Pseudomonas** 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 (*P. solanacearum*, *P. amygdali*...).

1-6-5-Xanthomonas

Les Xanthomonas appartiennent au phylum des Proteobacteria, classe des Gammaproteobacteria, ordre des Xanthomonadales et à la famille des **Xanthomonadaceae**. Cinq espèces distinctes constituent ce groupe : *X. albilineans*, *X. ampelina*, *X. axonopodis*, *X. campestris* et *X. fragariae*. 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.

1-6-6- Streptomyces

Les Streptomyces sont bactéries filamenteuses encore répertoriées comme eubactéries mycéliennes. Les Streptomyces sont des GRAM+ immobiles, aérobies strictes, chimiohétérotrophes qui ont la particularité d'être sporulantes, à maturité le mycélium aérien forme des chaînes de trois à de nombreuses spores. Quelques souches de Streptomyces produisent une grande variété de pigments qui colorent le mycélium et le substrat ; ils produisent également un ou plusieurs antibiotiques actifs contre les bactéries, les champignons, les algues, les virus, les protozoaires, ou des tissus tumoraux. 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. (*S. scabies* : agent de galles chez la pomme de terre).

1-6-7-Xylella

Les cellules bactériennes sont principalement des bâtonnets simples et droits, mesurant de 0,3 à 1 – 4 micromètres, produisant de longs brins filamenteux sous certaines conditions culturelles. Elles sont gram négatives, non mobiles, aflagellées, strictement aérobies et non pigmentées. Lors de cultures sur milieu solide, les colonies sont petites, avec marges lisses ou finement ondulées. Sur le plan nutritionnel, Xylella nécessite des milieux spécialisés ; leur habitat est le xylème du tissu végétal. *Xylella fastidiosa* est la seule espèce du genre *Xylella*, et cinq sous-espèces sont décrites : *fastidiosa*, *sandyi*, *multiplex*, *pauca*, *tashke*.

1-6-8- Ralstonia

Le genre Ralstonia est membre des β -Proteobactéries et a été longtemps classifié parmi le genre Pseudomonas. Ce groupe est majoritairement ressemblé au membre de groupe Pseudomonas et la seule différence que ses cellules ne produisent pas de pigments fluorescents.

2- Les champignons phytopathogènes

2-1-Définition

Les champignons sont des organismes eucaryotes (c'est-à-dire que leur cellule contient des organites liés à la membrane et des noyaux clairement définis). Ces organismes sont non mobiles. Certains champignons sont dimorphes car ils peuvent passer d'unicellulaires à multicellulaires selon les conditions environnementales. Les champignons unicellulaires sont généralement appelés levures. *Saccharomyces cerevisiae* (levure de boulanger) et les espèces de *Candida* (les agents du muguet, une infection fongique courante) sont des exemples de champignons unicellulaires. La plupart des champignons sont des organismes multicellulaires. Ils présentent deux stades morphologiques distincts : végétatif et reproducteur. Le stade végétatif est caractérisé par un enchevêtrement de structures filiformes minces appelées hyphes (singulier, hyphe)

Les champignons sont des organismes achlorophylles ce qui signifie qu'ils n'ont pas les pigments chlorophylles et poussent mieux dans un environnement acide (tolérant un pH acide). Les champignons sont à la fois hétérotrophe vis-à-vis du carbone et ont des pouvoirs de phagocyter des substances solides, des substances organiques et minérales à l'état dissout.

2-2-Morphologie de la cellule fongique

a) La paroi:

La paroi cellulaire est un organite cellulaire spécifique et complexe composé de glucanes, de chitines, de chitosanes et de protéines glycosylées. Les protéines sont généralement associées à des polysaccharides conduisant à des glycoprotéines. Ensemble, ces composants contribuent à la rigidité de la paroi cellulaire impliquent un grand nombre de voies de biosynthèse et de signalisation.

a) Les membranes plasmiques fongiques: sont similaires aux membranes plasmiques des mammifères, différents par le fait que le stérol et l'ergostérol sont non polaires contrairement au cholestérol des mammifères.

b) Le thalle:

Le corps végétatif du champignon s'appelle thalle, qui peut être unicellulaire constituée d'une seule cellule végétative, puis à maturité se transforme en une ou plusieurs organes reproductifs.

-Type de thalle

Thalle peut être unicellulaire : le thalle est formé d'une seule cellule le cas des levures ou pluricellulaires, psalmodiques ou filamenteux (Figure 27).

-Thalle plasmodique : masse protoplasmique. Un plasmode est une masse de cytoplasme dans

laquelle le noyau s'est divisé un grand nombre de fois sans qu'il y ait eu de cloisonnement par des membranes plasmiques. Chez les Plasmodiophoromycota, l'appareil végétatif (le thalle) est constitué d'un plasmode. Le plasmode est une cellule amiboïde polynucléée

Thalle filamenteux : Chez tous les autres groupes, le thalle, est filamenteux formé de filaments tubulaires cylindriques ramifiés ou non.

- les filaments peuvent être cloisonnés (septés) = hyphes possédant des septes régulièrement espacés et percés par une pore centrale, pouvant être simple, exemple : Ascomycota ou complexe le cas des Basidiomycota .

- non cloisonnés (dit coenocytiques) = appelés siphons. Possédant un cytoplasme continu renferme plusieurs noyaux. Les cloisons transversales apparaissent uniquement pour délimiter les organes de reproduction. exp. Oomycota, Zygomycota.

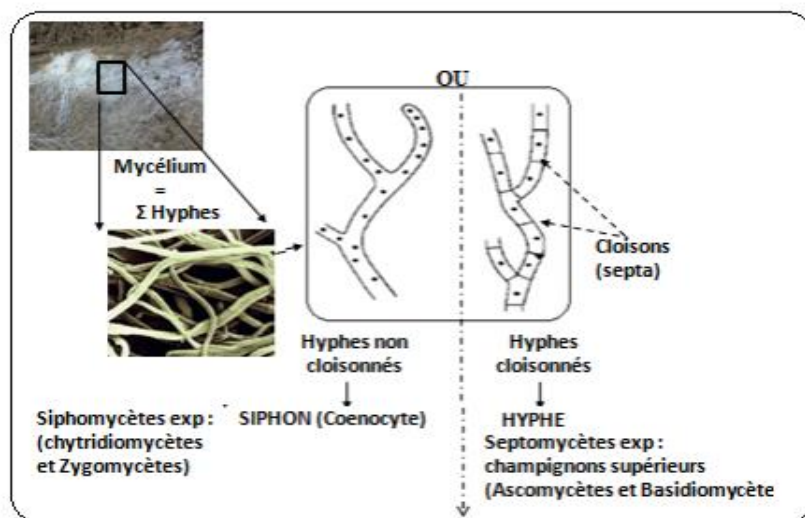


Figure 27: Formes des thalles chez les champignons

2-3- Structure mycélienne végétative

Le mycélium est un ensemble d'hyphes, qui présentent des variations importantes dans leur capacité à se fixer, à pénétrer et à survivre en se développant à partir d'une spore ou d'un fragment de mycélium.

a) Anastomose : former par la fusion de ramification d'un même hyphe ou d'hyphe différent pour

former un réseau.

b) Appressorium : organe spécialisée que certains champignons développent pour s'attacher et pénétrer les surfaces des plantes hôtes. Il agit comme une structure d'ancrage et peut produire des enzymes pour faciliter la pénétration du champignon dans les tissus végétaux.

c) Haustorium : organe qui sert à puiser les éléments nutritifs des cellules de l'hôte.

d) Rhizomorphes et sclérotés: Le mycélium peut subir des modifications et développe des structures végétatives plus ou moins agrégées en Stromes compacts comme les rhizomorphes et les sclérotés qui constituent deux types de stromes ayant une signification phytopathologique comme organes de conservation.

2-4- Mode de vie

a) Les champignons saprophytes: sont des champignons qui vivent aux dépens de la matière organique en décomposition.

b) Les champignons parasites: des champignons vivent aux dépens d'autres êtres vivants, leur hôte sont le plus souvent des végétaux, arbre, arbustes, herbes et des fois d'autres champignons.

c) Les champignons symbiotiques: ces champignons ont une relation avec des organismes vivants ils forment une association bénéfique ou symbiose, exemple des mycorhizes et celui des lichens.

Dans le règne végétal, tous les taxons peuvent être parasités par des champignons; selon leur degré 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). Ils peuvent adopter un mode de vie biotrophe, nécrotrophe ou hémibiotrophe:

- **Les champignons biotrophes (Parasites obligatoires):** requièrent un organisme vivant pour compléter leur cycle de vie. Il n'est pas dans l'intérêt biologique de ces champignons de provoquer la mort de leur plante hôte, ni de déclencher des réactions de défense. Cette catégorie d'agents pathogènes regroupe des champignons appartenant par exemples aux ordres des Pucciniales (agents de rouilles).

-**Les champignons nécrotrophes** : provoquent activement la nécrose des cellules de l'hôte et se développent sur les tissus nécrosés. *Botrytis cinerea*, responsable de la pourriture grise de plus de 1400 espèces végétales, est le champignon nécrotrophe ayant l'impact le plus important sur les cultures.

-**Les champignons hémibiotrophes** : requièrent un hôte vivant pour leur croissance végétative, puis finissent par provoquer la mort de cet hôte afin de se reproduire sur ses tissus morts. Cette

stratégie étant intermédiaire entre la biotrophie et la nécrotrophie. Dans cette catégorie figurent : *Fusarium graminearum*, champignon pathogène du blé , *Fusarium oxysporum*, qui infecte une centaine d'espèces de cultures maraîchères, *Zymoseptoria tritici*, agent de la septoriose du blé, et *Colletotrichum* spp, dont le spectre d'hôte regroupe la quasi-totalité des plantes cultivées.

2-5-Reproduction des champignons

La reproduction des champignons est complexe, Elle peut être :

- Asexuée (anamorphe = forme asexuée de fructification) donnant des spores asexuées.
- Sexuée (téleomorphe = forme sexuée de fructification) aboutissant à la formation des spores sexuées.
- Certains champignons alternent entre ces deux types de reproduction.

a) Asexuée

Les champignons se reproduisent de manière asexuée par fragmentation, bourgeonnement ou production de spores. Des fragments d'hyphes peuvent développer de nouvelles colonies.

La **fragmentation** mycélienne se produit lorsqu'un mycélium fongique se sépare en morceaux, chaque composant se développant en un mycélium séparé.

Les cellules somatiques de la levure forment des bourgeons, pendant le **bourgeonnement** (un type de cytokinèse), un renflement se forme sur le côté de la cellule, le noyau se divise par mitose et le bourgeon se détache finalement de la cellule mère.

Le mode de reproduction asexuée le plus courant est la formation de **spores asexuées**, qui sont produites par un seul parent (par mitose) et sont génétiquement identiques à ce parent.

Ces spores se transforment en cellules reproductives appelées mitospores qui, après dispersion, se développent en de nouveaux organismes.

La colonisation des milieux par les champignons est assurée par la production de spores de dissémination (Figure 28):

- **Sporangiospores** : Se forment à l'intérieur d'un sporange ou sporocyste. Lors de la sporogénèse (formation des spores), un filament mycélien (sporocystosphore) se dresse à partir du mycélium végétatif et son extrémité se renfle pour former le sporocyste. Un grand nombre de spores, généralement, sont produites au sein du sporocyste après division de son cytoplasme et sont libérées après rupture de la paroi du sporocyste. Ces endospores germent en donnant directement naissance à un mycélium.

- **Conidiospores** : Spores exogènes produites à la pointe ou sur les côtés des hyphes aériens.

Elles sont portées par un conidiophore.

- **Arthrospores** : se fait par fragmentation de l'hyphe végétatif avec délimitation des cellules.

- **Blastospores** : Produites par bourgeonnement d'une cellule végétative. Chaque conidie bourgeonne à son tour, conduisant à la formation de chaînes de conidies, la plus âgée étant à la base de la chaîne.

- **Chlamydo-spores**: (forme de résistance apparaissant sous forme d'articles terminaux ou intercalaires).

- **Zoospores**: certains groupes de champignons produisent des spores végétatives nues, mobiles dans l'eau grâce à un ou deux flagelles (zoospores) qui se forment à l'intérieur de sporanges portés par un sporangiophore.

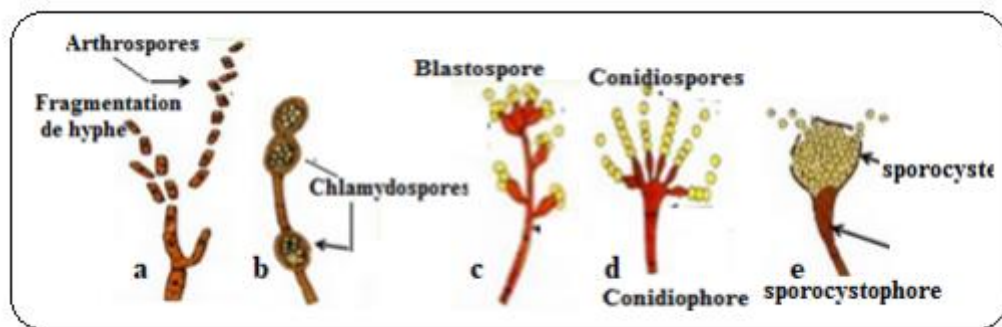


Figure 28: Formation des différents types de spores asexuées

b) Sexuée

Les champignons se reproduisant sexuellement, en fusionnant leurs hyphes ensemble dans un réseau interconnecté appelé anastomose. La reproduction sexuée commence lorsque les hyphes haploïdes de deux organismes fongiques se rencontrent et se rejoignent. Bien que les cytoplasmes de chaque organisme fusionnent ensemble, les noyaux restent séparés. Les hyphes produits sont appelés dicaryon, ont deux noyaux distincts. Le dicaryon forme des sporanges sexuels, dans lesquels les noyaux fusionnent en un seul. La cellule subit ensuite une méiose pour former des spores haploïdes et le cycle est répété. Certains champignons n'ont pas de phase diploïde à l'exception du sporange sexuel, tandis que d'autres ont complètement perdu la capacité de reproduction sexuée. (Figure 29).

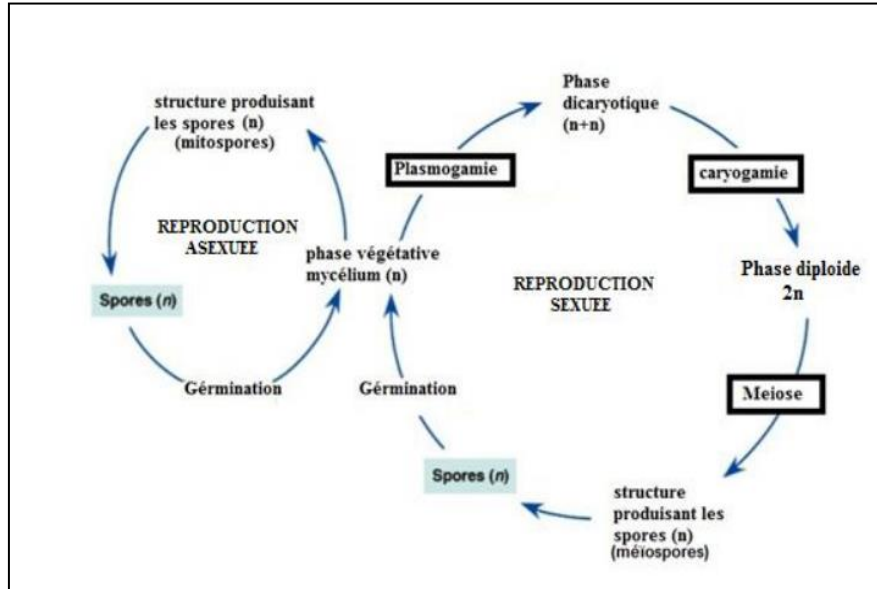


Figure 29: Reproduction sexuée et asexuée chez les champignons (Vertil et Hortidact, 2012)

2-6-Appareils sporifères des champignons

2-6-1 Appareils sporifères d'origine sexués

Le stroma est tapissé par une couche fertile appelée Hyménium est constituée par des asques ou des basides, selon la morphologie des stromas on distingue : Chez les Ascomycota : Appareils fructifères (ou ascocarpes) donnant naissance aux asques suivants (Figure 30) :

A. Cléistothèce: Ascocarpe complètement fermé.

B. Périthèce : Ascocarpe possédant un ostiole.

C. Pézize = Apothécie : ascocarpe étalé sous forme de disque ou de coupe complètement ouvert.

D. Pseudothèce : Ascocarpe porte des asques dans des locules (multiloculaire).

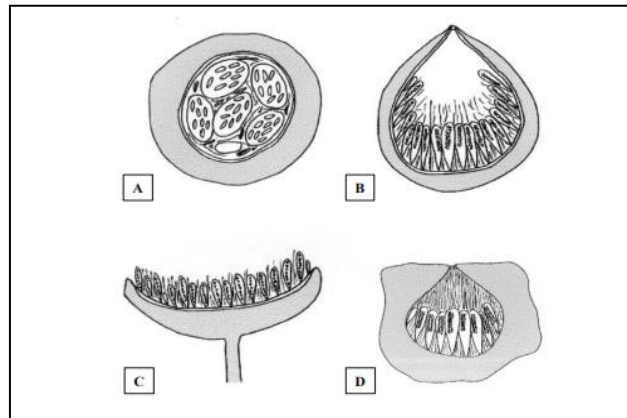


Figure 30: Appareils sporifères d'origine sexués.

2-6-2 Appareils sporifères d'origine asexués

Ils peuvent être constitués :

De filaments simples ou ramifiés formés de conidiophores ou sporangiophores portant respectivement des conidies ou des sporanges.

Filaments agrégés en stroma qui portent des conidiophores selon la morphologie du stroma, on distingue (Figure 31):

a -Pycnide : conceptacle plus ou moins sphérique et ouvert par un ostiole. Les pycnides se forment souvent sur les lésions des tissus végétaux infectés.

b -Acervule: fructifications recouvertes par les tissus de l'hôte, d'abord closes puis libres par suite à l'éclatement des tissus de l'hôte qui le couvre.

c - Corémie : fructifications composées de conidiophores dressés et agglomérés.

d - Sporodochie : fructifications composées de conidiophores courts et agglomérés.

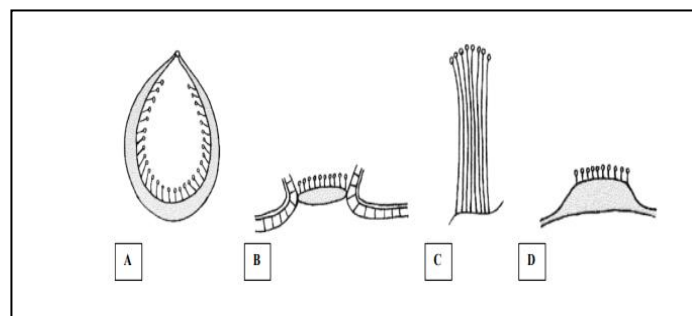


Figure 31 : Appareils sporifères d'origines asexués

(a)Arthospores ou spores thaliques (b)Blastospore, ou spores Blastiques. (c)Aggrégation de conidiophores ou hyphes aériens.

2-7- Classification des champignons phytopathogènes

Les champignons phytopathogènes appartiennent aux différents groupes du règne des eumycètes ou « champignons vrais ». Les agents phytopathogènes responsables de maladies cryptogamiques comprennent aussi des protistes : plasmodiophoromycètes, dont les genres les plus importants sont **Plasmodiophora** et **Spongospora**, et oomycètes, qui comprennent notamment la famille des **Peronosporaceae** (agents des mildious) (Figure 32).

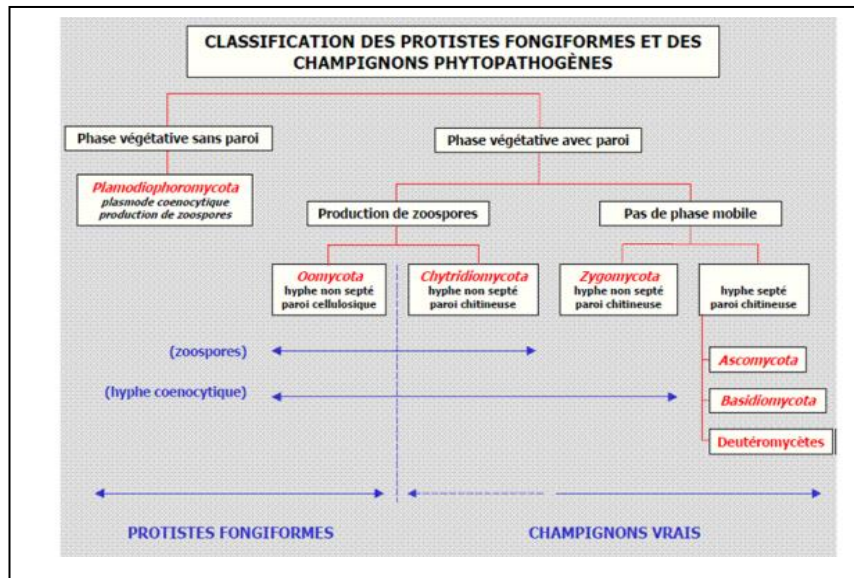


Figure 32 : Schéma récapitulatif des champignons phytopathogènes

2-7-1-Règne des Protozoa

Classe : Plasmodiophoromycètes

Ce sont des champignons dont le thalle est constitué d'un plasmode non cloisonné (coenocytique) contenant plusieurs noyaux.

- La reproduction sexuée se fait par la fusion de 2 gamètes flagellés morphologiquement semblables. Le cycle biologique produit 2 plasmodes : plasmode primaire (sporogène) évolue en zoosporanges et un plasmode secondaire (kystogène) produisant des spores de conservation capables de survivre à la dessiccation et de germer par une zoospore.
- Les spores de conservation émettent des zoospores biflagellées qui nagent dans la phase aqueuse du sol et infectent les poils radiculaires des végétaux sensibles en produisant des plasmodes.
- Comporte des parasites obligatoires des plantes supérieures. Parasites d'organes souterrains et de

tiges, chez les quelles produisent des hypertrophie des hyperplasies.

Plusieurs genres de **Plasmodiophoromycètes** sont responsables de diverses maladies végétales qui peuvent avoir un impact économique significatif sur l'agriculture et la production de cultures

-Spongospora : Ce genre de Plasmodiophoromycètes est responsable de la maladie appelée "gale des tubercules" chez les pommes de terre. Il provoque la formation de galles et de kystes sur les tubercules, ce qui peut réduire le rendement des cultures. Exp. *Spongospora subterranea*: agent de la gale poudreuse des Solanacées.

-Polymyxa : Les champignons du genre **Polymyxa** sont associés à la transmission de virus chez les plantes. Ils infectent les racines des plantes et agissent comme vecteurs pour la transmission de virus tels que le virus de la betterave jaune (Figure 33), le virus de la mosaïque du navet.



Figure 33: *Polymyxa betae* sur betterave transmet le virus BNYVV (Beet necrotic yellow vein virus)

<http://ephytia.inra.fr/fr/C/11148/Hypp-encyclopedie-en-protection-des-plantes-Plasmodiophoromycete>

-Plasmodiophora: *Plasmodiophora brassicae* est un organisme de ce genre qui provoque la maladie connue sous le nom de "club root" chez les plantes de la famille des *Brassicacées*, y compris le chou (Figure 34), le brocoli et le colza.



Figure 34: *Plasmodiophora brassicae* sur racines de chou.

<http://ephytia.inra.fr/fr/C/11148/Hypp-encyclopedie-en-protection-des-plantes-Plasmodiophoromycete>

-Sorodiscus : Les espèces de Sorodiscus sont connues pour provoquer des maladies racinaires chez différentes plantes, notamment les céréales et les plantes à fleurs.

-Ligniera : Les champignons du genre **Ligniera** provoquent la maladie appelée "Ligniera" ou

"Pourridié du hêtre", qui affecte les arbres, en particulier les hêtres.

2-7-2-Règne des Chromista

Composés d'espèces uni ou pluricellulaires, à mycélium non cloisonné, autre fois ces organismes étaient classés parmi les « champignons inférieurs » le phylum le plus important en phytopathologie est :

-Phylum : Oomycota

Ce sont des moisissures aquatiques formant des hyphes coenocytiques. Phytopathogènes importants, avec comme maladies de références, le mildiou de la pomme terre, la rouille de la pomme de terre et des maladies de poissons. Ils se comportent comme des champignons vrais, mais ils possèdent des caractéristiques des plantes en étant non photosynthétiques.

La multiplication asexuée des Oomycètes se fait par l'intermédiaire des zoospores qui se développent dans les sporanges. Deux types de zoospores biflagellées morphologiquement distincts sont produits par la plupart des Oomycètes en fonction de leur cycle biologique particulier (Figure 35). Le premier est appelé zoospore primaire et est piriforme avec les flagelles attachés à l'extrémité antérieure de la spore. Le second type est appelé zoospore secondaire et est pratiquement produit par tous les Oomycètes qui forment des zoospores. La fonction des zoospores dans le cycle biologique des Oomycètes est de nager sur des distances courtes dans l'eau.

La reproduction sexuée des oomycètes s'effectue par hétérogamétangie avec production d'oospores. (Figure 35).

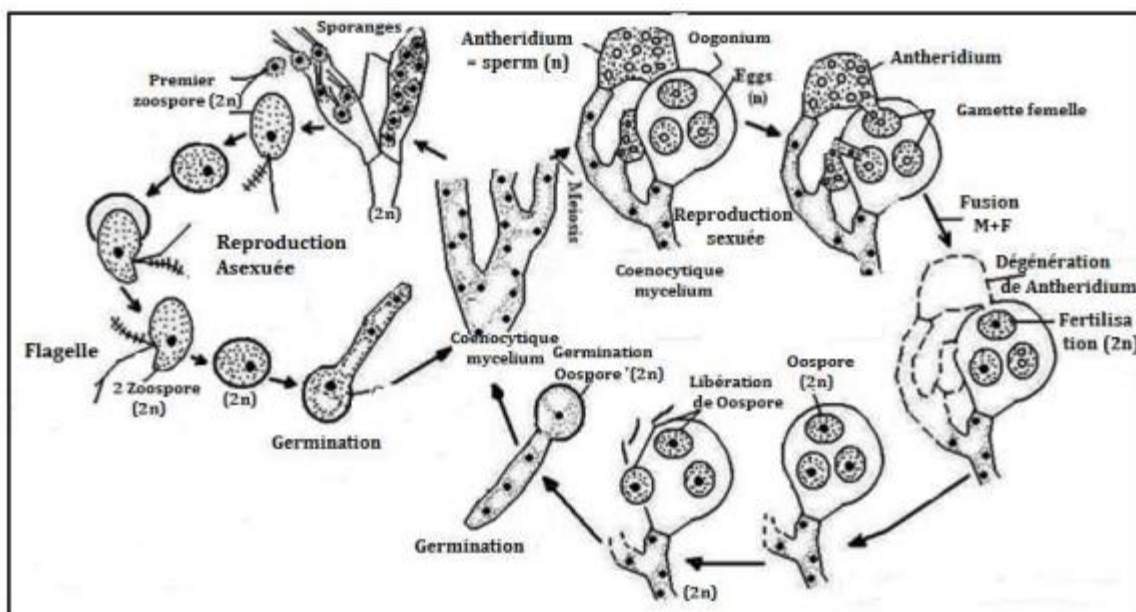


Figure 35: La reproduction des oomycètes

Le genre *Pythium* de la classe des oomycètes comprenant 120 espèces réparties dans différents habitats, la plupart sont pathogènes des plantes. Ce genre est capable d'infecter les graines et les plantules causant la maladie de la fonte de semis, comme exemple on cite :

Espèce : *Pythium debaryanum* et *P. ultimum* provoque les fontes de semis et manques à la levée chez les plantes herbacées et les arbres fruitiers. Il s'attaque également aux racines des plantes jeunes ou adultes, sur lesquelles il provoque des lésions nécrotiques au niveau de l'apex

Espèce : *Pythium graminicola* provoque la pourriture racinaire des céréales.

Le genre **Phytophthora** est un genre d'Oomycètes phytopathogènes infectant un grand nombre d'espèces végétales, comme exemple on cite :

Espèce : *Phytophthora parasitica*, agent de fonte de semis, plus particulièrement les plantules du Tabac.

Espèce : *Phytophthora infestans*, agent du mildiou de la Pomme de terre et de la Tomate.

2-7-3-Règne des Eumycota

Phylum des chytridiomycètes

Les chytridiomycètes ou chytrides sont des champignons flagellés aquatiques étroitement apparentés aux champignons ancestraux. Les zoospores mobiles sont une caractéristique de ce groupe. La reproduction asexuée des Chytridiomycètes a lieu par l'intermédiaire des zoospores qui se forment dans les sporanges uniflagellées (Figure 36) qui peuvent émerger à travers une ou plusieurs papilles quand le sporange se décharge. La reproduction sexuée, les Chytridiomycètes sont les seuls champignons à posséder des cellules sexuelles mobiles appelées (anthérozoïde) munies de flagelles libéré à partir d'un gamétange mâle, fécondant un gamète femelle non mobile (œuf). Les noyaux des gamétanges subissent une mitose (division) pour former des gamètes (haploïdes). La fusion de deux gamètes de sexe différent aboutit à un zygote diploïde. Le zygote subit une mitose du noyau produisant une multitude de zoospores flagellée diploïdes. La germination de ce dernier produit des organismes munis de sporanges (enveloppes de forme sphérique). Les sporanges extrêmement résistants aux aléas climatiques. Après une phase de dormance, ces noyaux subissent une méiose (division d'un noyau diploïde formant quatre noyaux haploïdes). Ces noyaux haploïdes se développent pour produire des zoospores haploïdes.

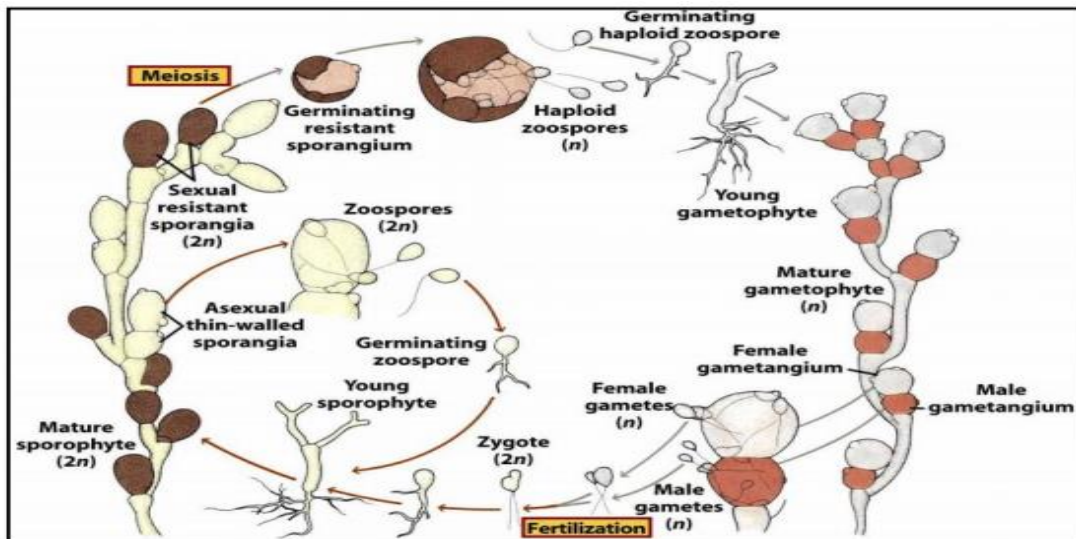


Figure 36 : Cycle biologique des Chytridiomycète

1)- Genre : *Olpidium*

Espèce : *Olpidium brassicae* Parasite des racines de crucifères, légumières et graminées fourragères.

2)- Genre : *Synchytrium*

Espèce : *Synchytrium endobioticum* la gale noire ou la Gale verruqueuse de la pomme de terre.

- Phylum des zygomycètes

Les Zygomycètes comprennent environ 900 espèces, qui appartiennent en majorité aux moisissures. La plupart vivent en milieu terrestre dans le sol sur des matières végétales et animales en décomposition.

Ce sont des champignons à spores non flagellés, dans lesquelles les cellules ne sont pas séparées par des cloisons, leurs hyphes étant coenocytiques ou siphonnés, avec de nombreux noyaux dans un même siphon.

La reproduction sexuée des zygomycètes s'effectue par la conjugaison d'hyphes mâles (+) et d'hyphes femelles (-). Quand deux hyphes compatibles se touchent (progamétange), elles se fondent (gamétange) et donnent naissance à un prozygosporangium par la plasmogamie et la fusion de deux noyaux, un noyau (+) et un noyau (-) et forment ainsi, un noyau diploïde (2n). Ce zygosporangium jeune commence à s'agrandir pour former le zygosporangium mûr qui contient une seule zygospore. Cette zygospore germe, formant un sporange dont les spores haploïdes germent à leur tour (Figure 37).

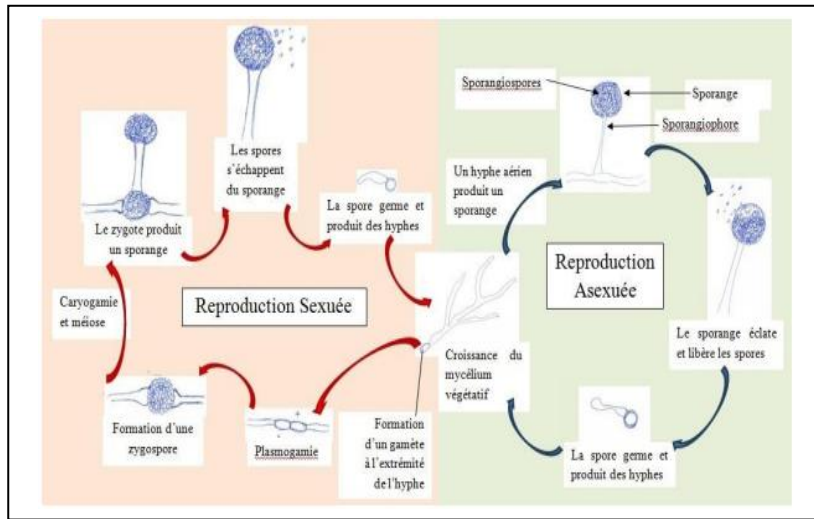


Figure 37: Cycle biologique des zygomycètes

Dans le cycle de reproduction asexuée, les spores, sous des conditions favorables, germent et donnent naissance à un tube germinatif, lequel se développe pour former un mycélium aérien. Le mycélium émet des stolons aériens qui développent des rhizoïdes à certains points, avec un ou plusieurs sporangiophores sont formés. Ensuite, l'extrémité de chaque sporangiophore commence à se gonfler et à donner origine à un sporange. Après sa maturité, il se casse en libérant ses spores dans l'air (Figure 38).

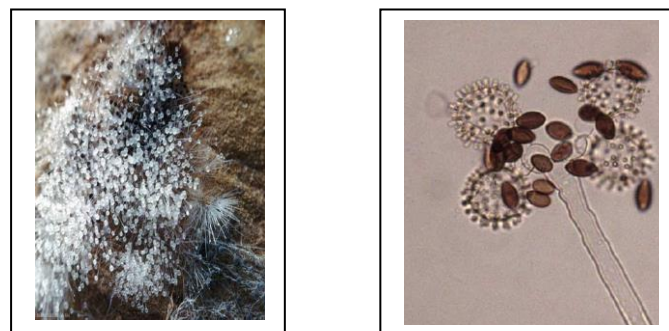


Figure 38: Illustration des spores produites dans un sporange chez les zygomycètes

[Hyp : encyclopédie en protection des plantes - Zygomycètes \(inra.fr\)](http://encyclopedie.en.protection.des.plantes-Zygomycetes.inra.fr)

Les Zygomycètes sont des parasites de faiblesse, plutôt saprophytes ou sont des parasites secondaires de certaines plantes et produits végétaux sur lesquels ils provoquent des pourritures ou des moisissures molles. Les espèces qui sont pathogènes appartiennent aux genres *Choanephora*, *Mucor* et *Rhizopus* (Figure 39).

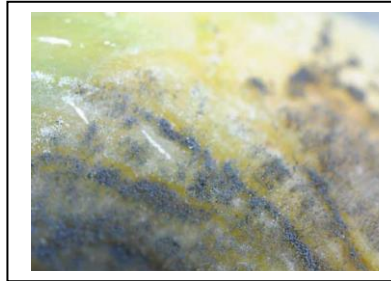


Figure 39: *Rhizopus stolonifer* parasite secondaire fructifiant sur concombre
 Hypp : encyclopédie en protection des plantes - Zygomycètes (inra.fr)

- Phylum des Ascomycota

Les Ascomycota est le groupe le plus grand et le plus diversifié de champignons existants, les ascomycètes comprennent environ 60 000 espèces. Les cellules sont cloisonnées avec des filaments séparés par des parois transversales cellulaires appelées septa. Les ascomycètes produisent des spores sexuelles appelées ascospores, qui se forment dans des structures en forme de sac appelées asques. Ces asques sont réunis ou non dans un ascocarpe (périthèce, cléistothèce, apothécie) (figure 40), et des spores asexuées, ou conidies, qui sont extrêmement petites, ornées sur des conidiophores plus ou moins développés, libres ou contenus dans une structure (pycnide, acervule, sporodochie).

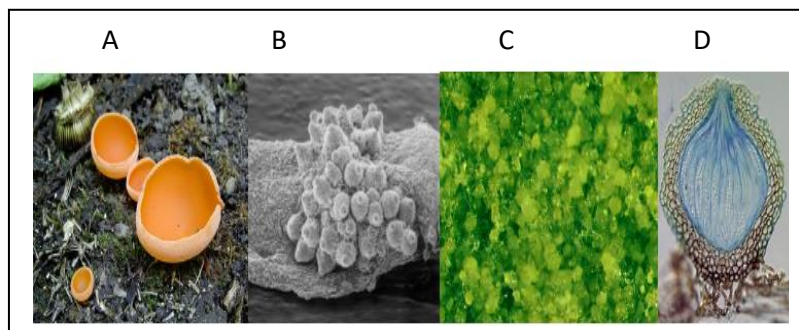


Figure 40 : Les quatre principales morphologies ascomales ou sporocarpes

A Apothécie d’*Aleuria*. B Périthécie de *Neurospora*. C. Cleistothecia d’*Eupenicillium*. D *Ascostroma* de *Tubeufia*
 Spatafora, Joey. 2007. Pezizomycotina. Version 19 December 2007. <http://tolweb.org/Pezizomycotina/29296/2007.12.19> in The Tree of Life Web Project, <http://tolweb.org/>

Les spores donnent après germination des hyphes (mycéliums) qui produiront eux mêmes des structures à noyaux multiples, respectivement les ascogones et les anthéridies. Dès que les conditions du milieu sont propices, l'ascogone émet alors un prolongement qui vient fusionner avec une anthéridie ; les noyaux pénètrent alors dans l'ascogone et s'apparient sans fusionner, c'est ce qu'on appelle la plasmogamie. L'ascogone va ensuite produire des hyphes cloisonnés dans lesquels migrent les noyaux appariés (deux par cellule = $n + n$ chromosomes). L'ensemble de ces hyphes cloisonnés forme un ascocarpe ou champignon à proprement parlé. C'est le stade dicaryotique ($n + n$ chromosomes) (Figure 41). Dans chaque cellule terminale dicaryotique des hyphes cloisonnés, les 2 noyaux vont enfin fusionner (= caryogamie) et donner ainsi une cellule mononucléaire à $2n$ chromosomes. Celle-ci va se transformer en un asque. C'est le stade diploïde ($2n$ chromosomes). Dans chaque asque, le noyau va subir deux divisions, une « réduction chromatique ou méiose » et une mitose, pour donner huit spores, ou ascospores, avec n chromosomes.

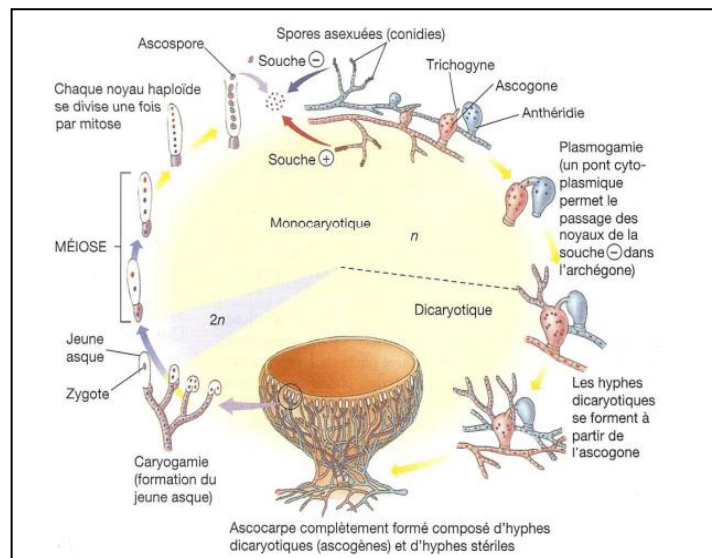


Figure 41 : Cycle de reproduction des ascomycètes D'après Raven et al. (2007).

-Phylum des Basidiomycètes

Les basidiomycètes sont les plus évolués des mycètes. Les organismes du phylum des Basidiomycota regroupent 31500 espèces. Leur mode de vie est principalement saprophyte, ce sont d'ailleurs les organismes fongiques ayant les capacités de dégradation de matériels ligno-cellulolytiques les plus élaborées. Le thalle des basidiomycètes est un hyphes cloisonnés.

La plupart des espèces se reproduisent sexuellement avec un organe porteur de spores en forme de massue (**basidium**) qui produit généralement quatre spores sexuelles (**basidiospores**) et les basides sont portées sur les organes de fructification et les basidiospores sont d'origine exogène

(Figure 42,43).

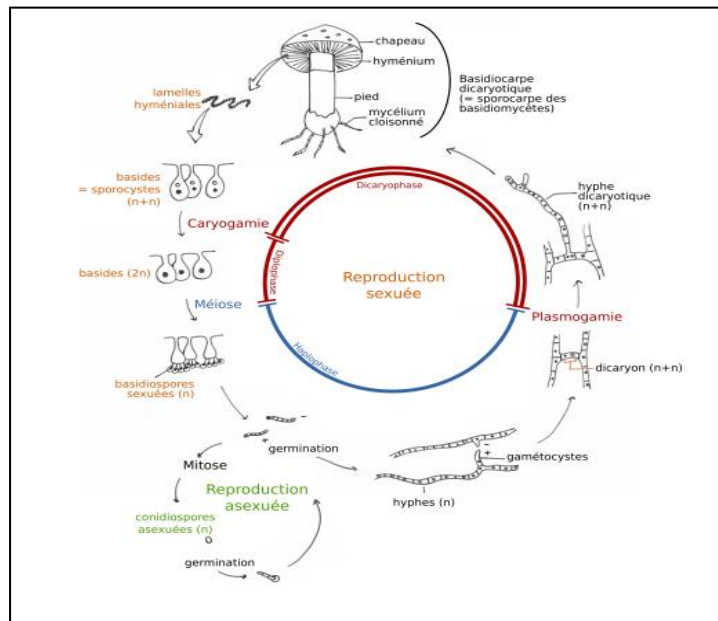


Figure 42: Cycle biologique des basidiomycètes.

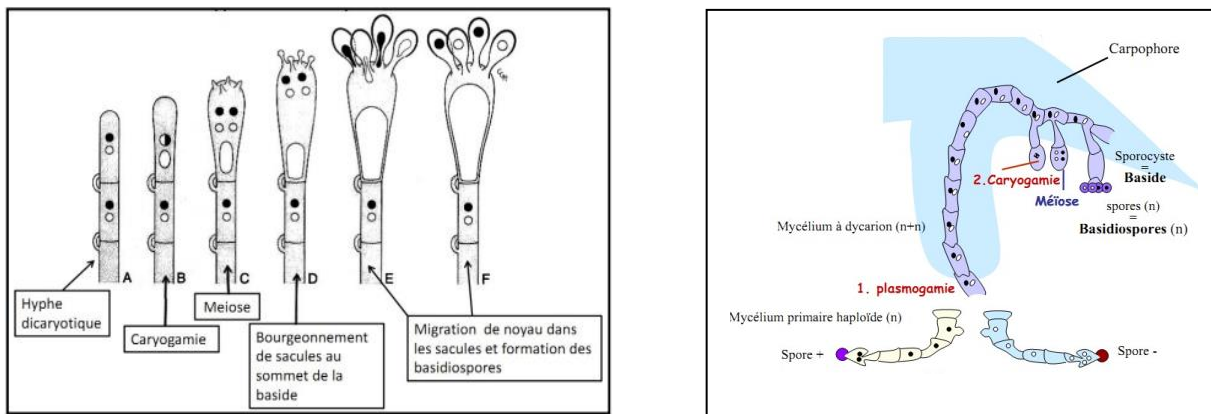


Figure 43: Stade de développement des basidiospores au sein d'une baside.

Certains des Basidiomycota ont leurs anamorphes dans les Agonomycètes (Deutéromycètes). Sur le plan de la systématique, on distingue : les Urédinomyètes, les Ustilaginomyètes, les Hyménomyètes.

- Les Urédinomyètes : ce sont des champignons parasites responsables des rouilles. Ces rouilles ont généralement un cycle biologique complexe. exp *Uromyces trifolii-repentis* : agent de la rouille du trèfle, - *Uromyces viciae-fabae* : agent de la rouille de la fève (Figure 44)

- Les Ustilaginomyètes : regroupent un ensemble de champignons provoquant des maladies

connues sous le nom de charbons ou caries, avec production de masses caractéristiques de téliospores noires dans les organes floraux ou sur les feuilles. exp *Ustilago maydis* : agent du charbon du maïs et *Ustilago striiformis* : agent du charbon strié des graminées (Figure 45).

- Les Hyménomycètes : ce sont les Basidiomycota typiques caractérisés par des basides non cloisonnées disposées en hyménium dans un appareil fructifère appelé Basidiocarpe.



Figure 44: Agent de la rouille de la fève (*Uromyces viciae-fabae*)



Figure 45 : Maladie de la rouille.

A: *Ustilago maydis* ,B: *Ustilago striiformis*

- Phylum : Deutéromycète

Les Deutéromycètes, ou champignons conidiens, sont un groupe d'environ 17000 espèces distinctes dans lesquelles les caractéristiques de reproduction sexuée ne sont pas connues ou ne sont pas utilisées pour les classer. Leur manque d'étapes sexuelles a été à l'origine de leurs noms de champignons imparfaits dans le passé.

Actuellement les champignons Anamorphiques (Deutéromycètes) ne sont plus considérés comme une catégorie taxonomique formelle puisqu'ils ne forment pas une unité monophylétique. Ce sont des champignons qui auraient perdu la faculté de se reproduire sexuellement ou qui sont des anamorphes d'autre phylums, principalement les Ascomycota et rarement les Basidiomycota.

3-Agents subcellulaires

3-1 Viroïdes (15 espèces) :

Ce sont des parasites intracellulaires stricts constitués d'ARN mono caténaire circulaire de 250 à 375 nucléotides, sans capacité codante, sans propriété antigénique. Leur réplication et multiplication dépend de la machinerie cellulaire de l'hôte.

Leur mode d'action est encore inconnu. On suppose qu'ils provoquent des interférences sur le métabolisme des ARN cellulaires.

Les viroïdes induisent des nanismes, des déformations, des dépérissements. Leur identification n'est possible que par hybridation moléculaire.

Leur transmission est essentiellement mécanique et certains insectes peuvent éventuellement servir de vecteur sans spécificité. Exemple de maladies : Tubercules en fuseau de la pomme de terre (Potato spindle tuber viroid PSTV).

3-2 Virus (plus de 500 espèces) :

Ce sont des parasites intracellulaires stricts. Leur acide nucléique peut être du DNA (minorité) ou du RNA mono ou bi caténaire, circulaire ou linéaire, de polarité positive ou négative.

Toute particule virale est constituée d'au moins deux éléments constants et obligatoires:

- Le génome, de nature nucléotidique et composé d'acide nucléique (ADN ou ARN)
- La capsid, est une coque de nature protéique qui entoure le génome et est capable d'assurer sa protection et sa survie dans le milieu extérieur, Leur forme peut être soit bâtonnets (mosaïque de tabac), soit en filament, d'une longueur allant jusqu'à 200 à 700nm (virus de la pomme de terre), soit de particule sphérique (mosaïque de concombre), ou encore bacilliforme (mosaïque de la luzerne). Le virion se reproduit uniquement à partir de son matériel génétique par réplication de son génome. Il n'existe pas de scissiparité comme chez les bactéries et il n'y a pas de mitose

comme dans les cellules eucaryotes.

Le génome peut être divisé et permet l'expression de protéines non structurales pour la réplication virale et le mouvement de cellule à cellule et de protéines structurales (capside). La taille des génomes varie de 1500 à 15-20000 nts avec une capacité codante de 4 à 10 gènes.

Leurs modes d'action sont souvent peu connus. Les infections virales provoquent de nombreux types de symptômes (nanisme, chloroses, nécroses, mosaïques, rabougrissements, jaunisses, ...etc.) qui sont parfois exploités en horticulture pour leur propriétés ornementales (zébrures, taches sur feuilles et pétales de variétés horticoles). Les symptômes sont souvent insuffisants pour identifier le pathogène car ils dépendent du milieu, de la variété de plante, et de la souche virale. En général, l'appel à des tests sérologiques et moléculaires est souvent nécessaire pour compléter les identifications biologiques sur plantes indicatrices.

Sur plante hôte, le passage du virus de cellule à cellule se fait par les plasmodesmes et le transport dans la plante entière, s'il existe, utilise le système vasculaire. La transmission des virus se fait par contact physique (greffe, blessure) ou par des vecteurs (insectes, champignons, nématodes) selon un mode persistant ou non, avec une grande spécificité. Exemple de maladie : Mosaïque du tabac, du concombre, sharka (pêchers, pruniers, abricotiers ...etc.).

Exemples de virose Mosaïque du rosier

- Type : Virus
- Période d'attaque : Printemps, Eté, Automne
- Partie(s) touchée(s) : feuilles, fleurs
- Description : Divers types de virus sont responsables de cette mosaïque sur les feuilles, notamment le virus latent du ring spot du framboisier et celui de la mosaïque du rosier (figure 46).



Figure 46 : Virus de la mosaïque du rosier

- Symptôme(s) : Les nervures des feuilles présentent les mouchetures, des marbrures ou des bandes plus claires, comme une mosaïque. Les feuilles sont marquées par des points jaunes. Quelquefois, les fleurs sont touchées : elles sont légèrement décolorées et manquent de vigueur.

3-2-1- Modes de dissémination des virus :

a- La transmission verticale : Correspond à la transmission du virus à la descendance d'une plante infectée. Elle est très fréquente chez les plantes à multiplication végétative. Tous les organes de multiplication bouturent, greffons, tubercules, bulbes prélevés sur une plante mère virosée seront infectés car les virus provoquent des maladies généralisées.

b- La transmission horizontale : Permet aux virus de passer d'une plante à une autre et fait intervenir des intermédiaires qui sont appelés les vecteurs de virus. Il y a plusieurs modalités de transmission selon les couples vecteurs / virus. On distinguera les virus non-circulants des virus circulants dans le vecteur :

b-1. Les virus non-circulants : également qualifiés de virus non persistants, ils restent localisés au niveau des pièces buccales du vecteur et la durée de rétention est très brève dans le vecteur (de l'ordre de quelques secondes). En effet après acquisition par le vecteur, le virus doit être ré-inoculé très rapidement pour pouvoir se propager. Pour les virus semi-persistants la durée de rétention est plus longue (quelques heures), le temps séparant l'acquisition du virus de sa ré-inoculation sera alors d'autant plus long.

b-2. Les virus circulants: également qualifiés de virus persistants, sont internalisés dans le vecteur après ingestion (et de ce fait ne se perdent pas au cours des mues). Ils sont localisés dans l'hémolymphe du vecteur. On distingue ensuite les virus capables de se multiplier à l'intérieur du vecteur (virus circulants et multipliant) et des virus qui ne se multiplient pas à l'intérieur du vecteur (virus circulants non multipliant). Dans le premier cas, le vecteur apparaît être un hôte à part entière du virus, alors que dans le deuxième cas, le vecteur n'est qu'un véhicule permettant au virus d'aller d'une plante à l'autre.

3-2-1 Quelques exemples de maladies virales des plantes :

- Mildiou de la pomme de terre : cette maladie est causée par le virus du mildiou de la pomme de terre (Potato Mosaic Virus: PMV). Le PMV est un virus à ARN qui est transmis par des spores d'oidium. La maladie se caractérise par la formation de taches brunes sur les feuilles, les tiges et les tubercules de la pomme de terre.
- Moucheture de la tomate : cette maladie est causée par le virus de la moucheture de la tomate (ToMV). Le ToMV est un virus à ARN qui est transmis par des insectes vecteurs, tels que les pucerons. La maladie se caractérise par la formation de taches jaunes ou brunes sur les feuilles de la tomate.
- Mosaïques du tabac : cette maladie est causée par le virus de la mosaïque du tabac (Tobacco Mosaic Virus: TMV), mais il peut également infecter d'autres plantes de la famille des Solanacées, ainsi que

certaines plantes ornementales et légumières. En effet le TMV est l'un des virus végétaux les plus étudiés en raison de son impact significatif sur l'agriculture, ce dernier est transmis par des insectes vecteurs, tels que les pucerons. La maladie se caractérise par la formation de taches jaunes ou vertes sur les feuilles de tabac.

- Mosaïque du chou : cette maladie est causée par le virus de la mosaïque du chou (Cabbage Mosaic Virus: CMV). Le CMV se caractérise par la formation de taches jaunes ou vertes sur les feuilles de chou ainsi que leurs déformations.

4-Les maladies dues aux nématodes

4-1-Biologie des nématodes :

Les nématodes (Némathelminthes) ou "vers ronds", forment un groupe zoologique d'organismes vermiformes. Ils sont dépourvus de membres et de squelette et ont la forme d'un fuseau. Ils présentent une symétrie bilatérale. Le corps est non segmenté et recouvert d'une épaisse cuticule.

La majorité des nématodes telluriques mesurent entre 0,6 et 0,8 mm de long entre 0,025 à 0.50 mm de large (Figure 47).

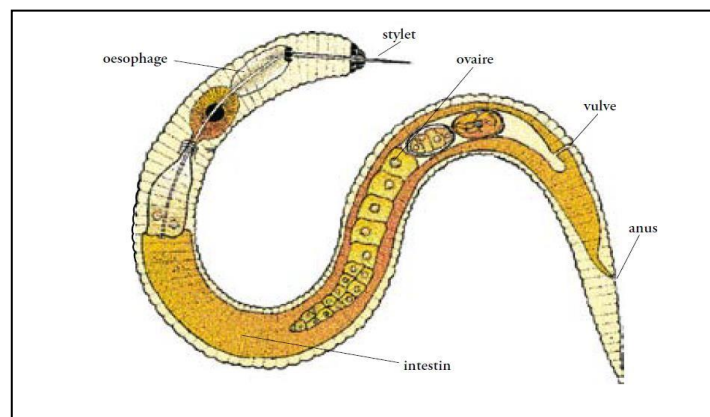


Figure 47: Anatomie générale d'un nématode parasite.

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

Les nématodes se conservent dans le sol et les débris de racines sous forme de juvéniles et d'œufs.

Après la germination, les jeunes racines sécrètent des substances qui attirent les juvéniles qui y pénètrent.

L'appareil reproducteur mâle comprend un ou deux testicules, deux spicules qui sont les organes de copulation.

L'appareil reproducteur femelle est formé d'un ou deux ovaires, d'un utérus et d'un vagin. La vulve a une position variable suivant les espèces mais elle est généralement située au milieu du corps lorsqu'il y a deux ovaires. Une femelle adulte peut pondre 200 à 500 œufs.

4-2-Mode de reproduction

La reproduction des nématodes peut se faire par:

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

-Reproduction parthénogénétique: mode de reproduction asexuée, qui ne nécessite pas l'intervention des spermatozoïdes du mâle (pas de fécondation).

Dans la parthénogenèse méiotique, la descendance n'est pas génétiquement identique à la mère (recombinaison après méiose) ; dans la parthénogénèse mitotique, tous les descendants sont génétiquement identiques à leur mère Hermaphrodisme: cas particulier de la reproduction bisexuelle.

Un nématode hermaphrodite est autofertile, 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.

4-3-Relations avec l'hôte et dégâts occasionnés sur la plante

Les nématodes phytoparasites sont des parasites obligés. Cela signifie que pour survivre, compléter leur développement et se reproduire.

ils doivent se nourrir sur les racines ou les parties aériennes d'une plante vivante.

Certains ont une gamme d'hôtes très restreinte alors que d'autres tel que *Meloidogyne incognita* attaquent plus de 2000 plantes connues.

Le mode de parasitisme a permis de subdiviser les nématodes phytoparasites en quatre grands groupes:

a) les ectoparasites: Ils se nourrissent sur les cellules se trouvant à la périphérie ou à l'apex des racines. Ils sont capables de se déplacer d'une racine à une autre. les *Trichodorus*, les *Longidorus* et les *Xiphinema*.

b) les endoparasites migrants: ils pénètrent dans les racines, s'y déplacent peuvent en ressortir et changer de racine. *Scutellonema*, *cavenessi* en est un exemple.

c) les endoparasites sédentaires: ils pénètrent totalement dans la racine s'y fixent et ne quittent plus le site choisi.

Les *Meloidogyne*, les *Heterodera* et les *Hylonema* sont des endoparasites. Chez ces trois genres le corps de la femelle devient pyriforme et parfois fait saillie à l'extérieur de la racine.

d) les semi-endoparasites: ils se fixent en un point de la racine. Seule une partie du corps, la tête, pénètre dans la racine, le reste du corps se trouvant à l'extérieur. C'est le cas de *Rotylenchulus reniformis* dont le corps de la femelle se renfle; celle-ci devenant sessile.

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

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

4-5-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

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

- Formation de galle, ou gonflement anormal des grains (*Anguina*) ou des feuilles (*Cynipanguina*),
- Des stries, blanchissement et décoloration des feuilles (*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

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 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

L'arrachage des plantes ou le dégagement des racines est nécessaire pour observer ces symptômes, qui comprennent (Figure 48 et 49):

- 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.



Figure 48: Symptômes provoqués par *Meloidogyne graminicola* sur un plant de riz.
<http://nemaplex.ucdavis.edu/Taxadata/G076s7.aspx>



Figure 49: Symptômes de nématodes à galles (*Meloidogyne sp.*) sur la betterave.
<https://www.agrifind.fr/alertes/betterave/betterave-nematode-galle/>

III-Interactions entre les plantes et les microorganismes

D'une manière générale, les plantes mettent en œuvre des mécanismes très efficaces qui contrôlent leurs rapports avec les agents potentiellement pathogènes. A cet égard, il est classique de distinguer différents types de d'interaction

1-Interaction non-hôte

Dans cette interaction le microorganisme, potentiellement pathogène, est incapable de pénétrer ou de se reproduire et la plante n'est pas affectée par le pathogène. La plupart des interactions entre les plantes et les agents pathogènes sont des interactions non-hôte. Ainsi, la résistance non hôte est définie comme l'immunité d'une espèce présentée par la plante entière contre toutes les variantes génétiques de l'agent pathogène.

La résistance non hôte pourrait dépendre de multiples mécanismes protecteurs que constituent les barrières constitutives et des réactions induites.

Au plan mécanique, la plante se protège des attaques des agresseurs par des barrières structurales constitutives : paroi pectocellulosique, cuticule, poils, trichomes, épines, etc. Au plan chimique, certaines plantes disposent de molécules de défense préformées, appelées phytoanticipines. Elles sont produites en permanence, même en l'absence d'agression. Ce sont des métabolites secondaires qui regroupent des composés phénoliques, des alcaloïdes (ex. le taxol de l'if), des terpénoïdes (ex. la

digitoxine de la digitale pourpre), des lactones, des saponines, des glycosides cyanogéniques et des huiles. Les défenses constitutives varient d'une plante à l'autre en fonction de leur environnement. Par exemple, "les plantes aromatiques qui poussent à l'état sauvage dans les pays méditerranéens ont une concentration plus élevée en métabolites secondaires (huiles essentielles) en raison de leur adaptation à une certaine sécheresse du sol sur une longue période". Ces défenses sont efficaces pour repousser la plupart des agressions. Certains agents pathogènes réussissent cependant à pénétrer dans les tissus végétaux internes en passant par les stomates, en profitant d'une blessure ou en détruisant les barrières protectrices. Leur présence peut être détectée par la plante au niveau de récepteurs et déclencher une résistance active.

2-Interaction hôte

Une interaction hôte est une interaction entre un microorganisme phytopathogène et une plante qui est son hôte naturel. Dans ce cas, le microorganisme phytopathogène peut infecter la plante et causer une maladie.

Les interactions hôtes peuvent être classées en fonction de la gravité de la maladie qu'elles causent:

-Interaction hôte incompatible

Dans ce cas, l'infection est impossible ou très difficile. Cela peut être dû à une incompatibilité génétique entre le microorganisme phytopathogène et la plante, ou à la présence de barrières physiques ou chimiques qui empêchent l'infection.

Le pathogène n'arrive pas à coloniser ou bien il est stoppé en chemin par la mise en place précoce de la réaction d'hypersensibilité provoquant la mort de la cellule attaquée et la mise en place du SAR, un système de résistance qui va s'exprimer partout et empêcher d'autres tentatives d'invasion. Une interaction est incompatible entre un hôte résistant et un agent pathogène avirulent même si l'espèce végétale est un hôte pour l'agent pathogène. La relation incompatible résulte de la présence d'un gène d'avirulence chez le pathogène qui reconnaît de façon spécifique, directement ou indirectement, le produit d'un gène de résistance présent chez la plante d'hôte (Figure 50).

-Interaction hôte compatible

L'interaction compatible se produit entre un hôte sensible ou de tolérance modérée et un (agent pathogène virulent. Il n'y a pas d'implication de produits de gènes spécifiques des deux partenaires (gène R de la plante et Avr- du pathogène) dans ces interactions, et donc pas de reconnaissance spécifique du pathogène qui peut alors coloniser la plante. Ceci est décrit par l'interaction hôte-parasite qui aboutit à une multiplication plus ou moins active du pathogène et à

une colonisation de tout ou une partie de l'hôte par ce dernier. La plante hôte est sensible; elle présente des symptômes de la maladie et éventuellement, des dégâts agronomiques.

Dans certains cas, des mécanismes de défenses de base des plantes peuvent être mis en place et entraîner une résistance partielle de la plante.

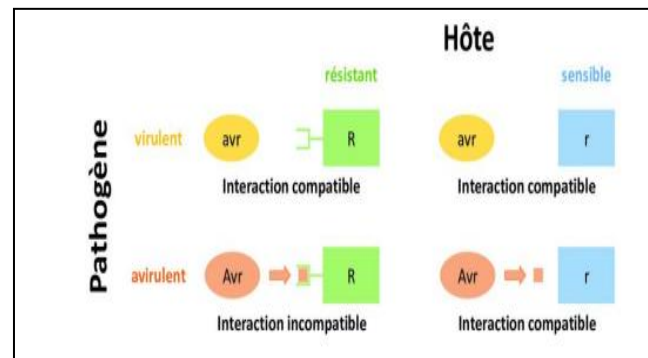


Figure 50: Représentation schématique des différents scénarii possibles du modèle gène-pour gène.

(Eoche-Bosy, 2016).

3-Les mécanismes moléculaires de la défense des plantes

Les plantes sont soumises à de nombreux stress abiotiques et biotiques. Pour se défendre contre ces agresseurs, elles ont développées des systèmes de défense complexes. Elles ont ainsi acquis des résistances à des agents pathogènes très divers : virus, bactéries, champignons, nématodes, insectes. A l'instar du système immunitaire des animaux, elles ont acquis la capacité de reconnaître spécifiquement leurs agresseurs et de fournir une réponse ciblée et adaptée.

3-1-Les défenses préformées : correspondent au premier obstacle auquel les agents pathogènes sont confrontés. Ce sont des mécanismes de résistance de la plante face aux agents pathogènes et des barrières physiques préformées de la plante. Aucun stimulus n'est nécessaire pour la mise en place des défenses préformées, elles sont actives de manière constitutive.

3-2-Les défenses inductibles : Elles constituent le deuxième obstacle auquel font face les agents pathogènes lors de l'infection d'une plante. Les plantes possèdent des systèmes de reconnaissance et de réponses de défenses induites qui sont déclenchées immédiatement après le premier contact avec des molécules étrangères et sont renforcées par l'interaction prolongée avec les agents pathogènes. De manière schématique, aboutir au déclenchement des défenses inductibles nécessite trois étapes successives : une reconnaissance de la présence de l'agent pathogène par la plante, suivie d'une transduction du signal, qui aboutit à l'activation des gènes de défense. Un certain nombre de défenses inductibles sont impliquées à la fois dans l'expression de la résistance hôte et de la résistance non-hôte, suggérant qu'elles peuvent être élicitées par des signaux respectivement

spécifiques ou non spécifiques. Ces signaux peuvent être produits par les agents pathogènes, ou peuvent résulter de la dégradation des cellules de l'hôte.

Lorsque l'agent pathogène réussit à franchir les défenses préformées, les cellules végétales sont capables de détecter des molécules de surface des agents pathogènes, molécules appelées PAMPs (PathogenAssociated Molecular Pattern). Un PAMP est une molécule qui fonctionne pour la plante hôte comme une signature de la présence de tout agent pathogène d'une classe donnée. Il peut s'agir de composés tels que la flagelline du flagelle des bactéries, les lipopolysaccharides de la membrane externe des bactéries GRAM -, ou encore la chitine, composant structural de la paroi des. La plante peut également percevoir une agression grâce à la reconnaissance de composés issus de la dégradation de ses propres constituants par l'agent pathogène, ces composés sont appelés DAMPs (DamageAssociated Molecular Pattern) ou éliciteurs endogènes. Les PAMPs/DAMPs sont reconnus par l'hôte grâce aux récepteurs PRRs (PAMP Recognition Receptor) situés dans la membrane plasmique via un unique domaine transmembranaire. Cette reconnaissance déclenche une résistance appelée PTI (PAMP-Triggered Immunity). Celle-ci peut retarder voire bloquer l'avancée de l'agent pathogène. Il s'agit de la phase 1 du modèle Zig-Zag. Au niveau de la phase 2 du modèle, les agents pathogènes n'ayant pas été arrêtés par l'étape précédente déploient des effecteurs à l'intérieur des cellules végétales qui vont alors bloquer la PTI, soit en interfèrent avec l'événement de reconnaissance, soit en intervenant au niveau de la transduction du signal. Il en résulte une sensibilité accrue du végétal appelée ETS (Effector-Triggered Susceptibility). La phase 3 du modèle correspond à la reconnaissance spécifique d'effecteurs de l'agent pathogène par des récepteurs de la plante, codés notamment par les gènes dit gènes de résistance (gènes R). On parle alors d'ETI (Effector-Triggered Immunity). L'ETI comprend la résistance dite gène-pour-gène. Cette dernière est un modèle développé antérieurement au concept d'ETI. Il explique que si à un effecteur donné de l'agent pathogène, alors dit facteur d'avirulence, correspond un gène R de reconnaissance chez l'hôte, alors l'agent pathogène sera avirulent et la plante présentera une résistance totale. Si par contre l'hôte ne possède pas de gène R permettant de reconnaître l'effecteur, alors dit facteur de virulence, l'agent pathogène sera virulent et la plante sensible. Les phases 4 et 5 du modèle en « Zig-Zag » représentent la co-évolution entre la plante et l'agent pathogène qui conduit à l'évolution des effecteurs avirulents pour contourner l'ETI, à l'origine d'une nouvelle phase de sensibilité du végétal (ETS), puis à l'évolution des récepteurs codés par les gènes R pour reconnaître ces nouveaux facteurs de virulence.

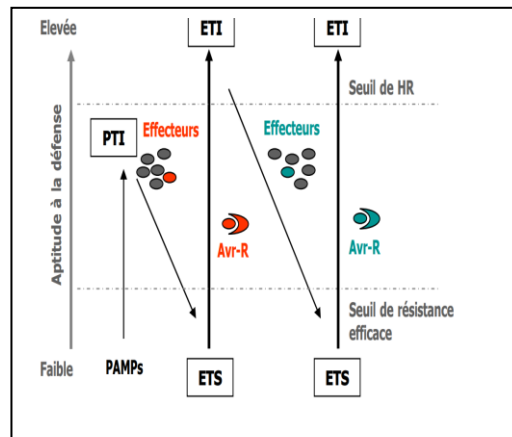


Figure 51 : Modèle en « Zig-Zag » d'après Jones et Dangl (2006).

En phase 1, les plantes détectent les PAMPs (en rouge) via les récepteurs PRRs pour déclencher la PTI. En phase 2, les agents pathogènes libèrent des effecteurs qui répriment la PTI, ce qui permet la nutrition et la multiplication des agents pathogènes à l'origine de l'état de sensibilité ETS. En phase 3, un effecteur (en rouge) est reconnu par un récepteur codé par un gène R, ce qui active l'ETI. En phase 4, l'évolution des agents pathogènes permet la mutation de leurs facteurs d'avirulence, qui deviennent donc des facteurs de virulence (en bleu). Ceux-ci ne sont, par conséquent, plus reconnus, permettant à l'agent pathogène de supprimer l'ETI et de déclencher une nouvelle ETS. En phase 5, l'évolution de la plante permet la création de nouveaux gènes R capables de reconnaître les nouveaux facteurs de virulence, qui redeviennent alors des facteurs d'avirulence, permettant ainsi à nouveau une ETI.

(ETI - Effector-Trigged Resistance, ETS - Effector-Trigged Susceptibility, PTI - PAMP-Trigged Immunity, PRR - Pattern Recognizing Receptor, PTI - PAMP-Trigged Immunity) .

IV-Principales méthodes de lutte

Les méthodes de lutte appliquées en agriculture varient considérablement d'une maladie à une autre en fonction du pathogène, de la plante hôte et de leur interaction chacun avec l'autre et avec l'environnement .Pour empêcher ou limiter les dégâts causés par les pathogènes sur les cultures, différentes approches sont disponibles. Les mesures utilisées peuvent être classées comme des méthodes biologiques, chimiques, physiques et méthodes génétiques.

1-Lutte chimique

La protection des plantes peut être assurée par une lutte chimique qui consiste à utiliser des pesticides pour protéger les productions agricoles contre de multiples agressions qui peuvent faire obstacle au bon développement des plantes, Selon la nature des parasites végétaux et animaux, ils portent différents noms : **Herbicides** (atrazine, pyridines (paraquat) ...) ;**Insectides** (organochlorés, carbamates (carbofuran) ...),**Fongicides** (bénomyl, marcoxèbe ...).**Acaricides** (diméthoate (dicofol),

1-1-Fongicides

Ce sont des substances destinées à détruire les champignons responsables des maladies des plantes, leurs utilisation cette dernière décennie, est devenue très répandue car elle vise à diminuer l'impact de la maladie et réduit 50 à 60% de sa sévérité .Ils peuvent être utilisés en mode préventif, en empêchant le développement des spores déposées à la surface de l'appareil végétatif de la plante, ou bien curatif aussi appelés fongicides systémiques, transportés par la sève en arrêtant ainsi le développement du champignon déjà installé. Souvent utilisés pour le traitement de Fonte des semis, brulure de plantules, pourritures des racines et du collet, qui sont causées par *Fusarium*, *Verticilium*, *Pythium*) et d'autres.

Ils peuvent aussi être appliquées pour :

-Traitement des semences le traitement des autres organes de multiplication tel que les tubercules, les bulbes, les rhizomes.....

-Traitement de parties aériennes appliqué en pulvérisation ou poudrage avec l'irrigation.

Peuvent être mélangés avec d'autres pesticides tels que des herbicides et des insecticides dans des traitements chimiques combinés utilisés contre différents agents pathogènes.

-Traitement des produits en conservation pour contrôler les maladies des produits végétaux en conservation, plusieurs fongicides ont été développés. Les fruits et légumes peuvent être lavés dans des solutions de fongicides après la récolte ou trempés avant le stockage.

Mode d'action

Ils peuvent agir sur les plantes en inhibant la division cellulaire. Soit en perturbant la biosynthèse des acides aminés, des protéines ou le métabolisme des glucides.

Ils s'attaquent aux spores des champignons en empêchant leur germination ou bloquent les divisions cellulaires des champignons.

Inconvénients divers :

-Développement de la résistance chez les parasites à combattre.

-Pollution des eaux de surface et des eaux souterraines.

-Atteinte à la santé des agriculteurs, par une exposition répétée aux résidus chimiques.

1-2 Insecticides

Ce sont des substances actives ou des préparations phytosanitaires ayant la propriété d'agir sur l'insecte cible et entre en contact avec ce dernier par simple adhérence, digestion ou inhalation. La plupart des produits agissent en tant que neurotoxiques et endommagent le système nerveux de l'insecte pour aboutir à sa mort. D'autres empêchent sa mue ou inhibent la faim, ce qui causera sa mort. D'autres encore agissent par asphyxie, interférence dans le métabolisme, ou encore comme poison.

-Modes d'action

- Attaque du système nerveux.
- Attaque du tube digestif.
- Destruction de la cuticule (carapace) de l'insecte.

-Avantages des insecticides

- Utilisation aisée.
- Effet immédiat.

-Inconvénients des insecticides

- Effets négatifs sur l'environnement (autres espèces d'insectes, oiseaux, poissons).
 - Apparition d'insectes résistants.
 - Certains insecticides restent actifs durant plusieurs mois, voire plusieurs années (insecticides rémanents),
- Effets sur la santé humaine.

2-Lutte physique

Les méthodes de lutte physique incluent toutes les techniques dont le mode d'action primaire ne fait intervenir aucun processus biologique ou biochimique (lutte abiotiques). On peut schématiquement répartir ces techniques en quatre grandes catégories : la lutte thermique, la lutte électromagnétique, la lutte mécanique, et la lutte pneumatique.

2-1- Lutte thermique

Elle consiste à causer des blessures internes aux ennemis des cultures visés (mauvaises herbes, ravageurs, pathogènes) par échauffement létal ou par diminution de la température en dessous du point de congélation. Ce mode de lutte nécessite une bonne connaissance des seuils de sensibilité thermique des bio-agresseurs, mais également de la culture à protéger si l'opération est effectuée pendant la culture.

Exemple :

- Défanage thermique des pommes de terre réduit significativement la viabilité de *Phytophthora infestans*, agent du mildiou présent sur les feuilles.
- Radiations électromagnétiques non ionisantes, qui tuent les insectes par réchauffement interne des individus.
- Des traitements à l'aide de micro-ondes de semences de blé ou d'orge ont été utilisés pour contrôler les agents de la fusariose *Fusarium graminearum* ou l'agent du charbon *Ustilago nuda*,
- l'ionisation par rayons X des denrées stockées, qui contribue à limiter les ravages des insectes dans les silos et dans les entrepôts de la distribution.

2-2-Chocs mécaniques

Elle concerne essentiellement la maîtrise des plantes adventices et des insectes. Dans le premier cas, différentes modalités de lutte mécanique sont possibles : travail du sol, fauche, utilisation de paillis, désherbage manuel et inondation. On a estimé que 50 à 70% des producteurs agricoles de la planète désherbaient manuellement.

Pour la maîtrise des insectes, l'utilisation de barrières physiques se révèle une méthode intéressante. Cette technique consiste à rendre plus difficile l'arrivée de ravageurs dans une zone de production en l'entourant ou en obstruant le passage. Cette technique est plus efficace en culture sous serre qu'en grandes cultures, mais des exemples positifs d'utilisation de barrières physiques contre les insectes nuisibles existent. Par exemple, une enceinte en acier a été utilisée pour protéger le blé et la luzerne de la sauterelle mormone (*Anabrus simplex Haldeman*), ravageur important dans le nord-ouest des Etats-Unis.

On peut citer aussi l'utilisation de barrières physiques : tranchées ou talus contre les insectes rampants, ou des filets pour protéger les vergers contre les oiseaux frugivores. C'est un mode protection aisément adaptable à la dimension des surfaces à protéger (parcelle, rang de culture).

Des films protecteurs (le plus souvent en polyéthylène) ou des vitres en verre ou en plexiglass, selon leur composition, qui filtrent ou absorbent les UV, sont utilisés en serre ou sous tunnel pour limiter le développement de la pourriture grise des tomates.

3- Lutte pneumatique (soufflage/aspiration)

Elle consiste à utiliser l'air en mouvement (soufflerie et/ou aspiration) pour éliminer les insectes ravageurs. Cette technique dépend fortement de l'insecte visé et de la culture à protéger. Elle s'est révélée efficace dans certains cas (Mouches blanches, aleurodidae ; punaise terne (*Lygus lineolaris*)). Utilisée uniquement contre les insectes, les courants d'air créés par le soufflage ou l'aspiration délogent les insectes, les entraînent dans des tuyaux où ils vont mourir en se heurtant aux parois ou en s'entrechoquant, ou encore en passant à travers la turbine (chocs mécaniques).

Avantages et inconvénients

- Coût des équipements.
- Formation spécifique du personnel pour éviter les accidents.
- Offre cependant des opportunités de réduction des pesticides de synthèse.

4-Lutte biologique

Peut être définie par l'usage d'organismes vivants ou de leurs produits pour empêcher ou réduire les pertes ou les dommages causés par des organismes nuisibles, elle s'appuie sur une stratégie de défense écologique et durable.

Les organismes vivants utilisés, communément appelés auxiliaires, antagonistes ou agents de lutte.

4-1-Lutte biologique contre les insectes

Regroupe plusieurs approches pour restreindre l'impact des ravageurs aux moyens naturels : Ennemis naturels, pathogènes (bactéries, champignons), phéromones et Hormones...

Amplification du rôle d'organismes auxiliaires par lâchers inondatifs

Cette stratégie qui repose sur l'utilisation d'organismes auxiliaires en grande quantité, La récente maîtrise des techniques de production en masse des organismes auxiliaires (ex : production de masse réalisée sur les œufs d'un hôte de substitution) a favorisé l'application de cette stratégie.

On peut citer par exemple :

- Les élevages, puis la distribution de coccinelles pour limiter l'extension d'une cochenille qui envahissait les citronniers ;
- Les opérations de lâchers d'un Hyménoptère pour combattre la Mouche de l'olive ;
- Les Trichogrammes utilisés contre la Pyrale du maïs *Ostrinia nubilalis*. L'avantage de ces auxiliaires est qu'ils sont oophages, ils détruisent donc la Pyrale dès son premier stade avant même qu'elle ne commette de dégâts.

La technique repose sur des lâchers inondatifs et saisonniers de 200 000 à 400 000 Trichogrammes parasites par hectare. Pour leur épandage en culture, les trichogrammes sont présentés sous la forme d'œufs parasités d'*Ephestia kuehniella* (teigne de la farine), conditionnés dans des capsules en carton biodégradables, percées, qui protègent les prédateurs contre les intempéries et qui simplifient la manipulation du produit. L'intervention doit être répétée chaque année au moment de la ponte du ravageur.

4-2- Organismes entomopathogènes et nématophages

L'agent pathogène auxiliaire peut être un champignon, une bactérie, un virus, un nématode un protozoaire. Il infecte l'hôte en général par ingestion ou par contact, et possède une forme de résistance lui permettant de passer - et de demeurer dans le milieu (sol, feuillage, litière).

L'agent pathogène va se multiplier dans l'hôte et causer sa mort par destruction de tissus, parfois par l'émission d'une substance toxique (cas des bactéries). Les cadavres de l'hôte libèrent les agents pathogènes dans le milieu. À ce jour, plusieurs milliers de microorganismes entomopathogènes et pathogènes des mauvaises herbes ont été décrits et plus d'une centaine d'espèces sont utilisées en champs. Les formulations de biocides à base de microorganismes deviennent de plus en plus

performantes avec des prix compétitifs, et l'utilisation des insecticides microbiens augmente rapidement, de 10 à 25 % par année.

4-3- Produits à base de *Bacillus thuringiensis*

Plus d'une centaine de bactéries ont été identifiées comme ayant un potentiel d'utilisation en lutte biologique. Ces bactéries entomopathogènes appartiennent surtout à trois grandes familles qui sont les **Bacillaceae**, **Enterobacteriaceae** et **Pseudomonaceae**. À l'heure actuelle, *Bacillus thuringiensis* (en abrégé en Bt) est l'espèce la plus utilisée dans la lutte contre les ravageurs.

La bactérie du Bt a la capacité de synthétiser et d'excréter des cristaux toxiques pour certains insectes. Ils sont formés de l'association de plusieurs protéines qui représentent près de 30% du poids sec en fin de sporogénèse. Seules ces protéines ont une propriété insecticide sur les lépidoptères, les coléoptères et/ou les diptères. Elles agissent en détruisant les cellules de l'intestin moyen de la larve d'insecte atteint par ces toxines, ce qui aboutit à la mort de l'insecte. Comparés aux insecticides chimiques, ils offrent l'avantage de ne pas tuer les ennemis naturels (même si ce point est aujourd'hui discuté). De plus, ce sont des produits qui ne sont **pas toxiques** pour l'utilisateur et les consommateurs.

4-4- Baculovirus

Ce sont des virus en bâtonnet dont le génome est constitué d'une molécule d'ADN bicaténaire de haut poids moléculaire. Appartenant à la famille des baculovirus (virus spécifiques des insectes et inoffensifs pour l'homme) qui est considérée comme la plus prometteuse pour des opérations de lutte microbiologique, en particulier en raison de son innocuité à l'égard de l'homme et des vertébrés.

Un certain nombre de chenilles sont sensibles aux virus de la granulose (type de Baculovirus que l'on rencontre chez les Lépidoptères). L'infection des chenilles par les virus a lieu par ingestion des particules virales lors des morsures. Après leur ingestion, les baculovirus vont se fixer sur les microvillosités des cellules épithéliales de l'intestin moyen des insectes qui sont sensibles à ces germes et se termine par la mort de l'insecte.

Les applications doivent coïncider avec l'éclosion des jeunes larves qui sont en effet sensibles aux viroses. Il est donc conseillé de contrôler les vols à l'aide de pièges sexuels et de suivre les avertissements phytosanitaires. Les adultes peuvent par contre être des vecteurs passifs ou transmettre la maladie à leur descendance.

4-5- Champignons entomopathogènes

Parmi les micro-organismes utilisés en lutte biologique, plus de 700 espèces de champignons sont entomopathogènes et jouent un rôle important dans la régulation naturelle des populations d'insectes.

Les hyphes des champignons entomopathogènes pénètrent dans les tissus des insectes et provoquent la mort de l'hôte. Citons parmi les plus connus, les Entomophthorales (champignons Zygomycètes inféodés aux Homoptères *Aphididae* et *Cicadidae*) et les Deutéromycètes (*Beauveria*, *Hirsutella*, *Metarhizium...*).

Les utilisations de champignons entomopathogènes dans les conditions agronomiques sont délicates du fait des difficultés technologiques de production, de la sensibilité des germes aux conditions environnementales, et des difficultés d'installation dans les parcelles.

4-6-Lutte biologique contre les microorganismes

Les microorganismes peuvent exercer une activité antagoniste selon différents mécanismes incluant : la compétition, l'antibiose et les actions sur la résistance de l'hôte. Parmi les champignons antagonistes les plus utilisés dans la lutte biologique, nous citons les genres : *Trichoderma* . *Bacillus* et *Pseudomonas*.

4-6-1-Mécanismes d'action d'un agent de lutte biologique

Antibiose

L'antibiose est le processus par lequel les composés diffusibles de faible poids moléculaire interagissent et réduisent la croissance d'autres microorganismes. L'antagonisme par antibiose est un mode d'action très répandu qui repose sur la production de métabolites secondaires de nature diverse, exerçant un effet inhibiteur voir létal sur l'agent pathogène

Il existe des métabolites qui peuvent agir avec la croissance des agents phytopathogènes par contre il ya des métabolites qui sont responsables de la perturbation de la perméabilité cellulaire des parasites.

Compétition

La compétition traduit une notion de rivalité entre deux ou plusieurs microorganismes. Au niveau de la rhizosphère, la compétition est intense et s'exprime par la colonisation de la surface racinaire. En effet, cette concurrence peut concerner la colonisation d'un espace, l'absorption d'éléments nutritifs (carbone, azote, fer, molécules organiques diverses, etc.) ou bien cibler des facteurs environnementaux qui deviennent limitant pour les pathogènes hôtes, ceux-ci n'ont plus la possibilité de se développer.

Parasitisme

Ce mécanisme consiste à une interaction directe entre deux microorganismes ou les cellules vivantes de l'un constituent une base nutritive pour l'autre.

4-6-2- Intérêt de la lutte biologique

Les principaux avantages de la lutte biologique sont son innocuité, sa spécificité, son absence de développement de résistance chez les ravageurs, son adaptabilité aux cultures et la potentielle valeur ajoutée aux produits ainsi cultivés. En plus de son rôle dans la restauration de la biodiversité dans l'écosystème.

5-lutte génétique

La lutte génétique contre les phytopathogènes est une méthode de protection des plantes qui consiste à développer des plantes résistantes aux phytopathogènes.

Il existe différentes méthodes de lutte génétique contre les phytopathogènes, notamment :

La sélection classique : elle consiste à sélectionner des plantes naturellement résistantes aux phytopathogènes.

La mutagenèse : elle consiste à induire des mutations dans le génome des plantes pour leur conférer une résistance aux phytopathogènes.

Hybridation : **L'hybridation** est une technique qui consiste à croiser des variétés de plantes pour combiner les caractéristiques souhaitées, y compris la résistance aux maladies. Cela peut conduire à la création de variétés plus robustes sur le plan génétique.

L'ingénierie génétique : elle consiste à transférer des gènes de résistance aux phytopathogènes d'une plante à une autre.

La lutte génétique contre les phytopathogènes présente plusieurs avantages:

- Efficace et durable, les plantes résistantes aux phytopathogènes ne nécessitent pas de traitement chimique, ce qui limite la pollution de l'environnement et le développement de la résistance des phytopathogènes aux fongicides.
- Respectueuse à l'environnement, elle ne nécessite pas l'utilisation de produits chimiques.
- Compatible avec la lutte intégrée, elle peut être utilisée en combinaison avec d'autres méthodes de lutte, telle que la lutte biologique.

Cependant, la lutte génétique contre les phytopathogènes présente également quelques inconvénients, notamment :

Elle peut être coûteuse, le développement de plantes résistantes aux phytopathogènes nécessite des recherches et des développements importants.

Elle peut être controversée : l'utilisation de l'ingénierie génétique dans l'agriculture est parfois critiquée.

Références bibliographiques

Agrios G.N. (2005). Plant Pathology, 5th edition. Elsevier-Academic Press, San Diego, CA: 592 p.

Ajouz S. (2009). Estimation du potentiel de résistance de *Botrytis cinerea* à des biofongicides. PhD. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon, France, 198 p.

Allioui N. (2020), Cours destinés aux étudiants de la 3ème année licence Biologie et physiologie végétale 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

Apel K, Hirt H.(2004).Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. Annu. Rev. Plant Biol. 55:373–99.

Astier S, Albouy J , Maury, Y , Lecoq, H. (2001). Principes de virologie végétale : génome, pouvoir pathogène, écologie des virus. Paris, FRA : INRA Editions.

Corbaz R. (1990). principes de phytopathologie et de lutte contre les maladies des plantes. Ed. Presses polytechniques et universitaires Romandes : 286 p.

Goodwin S. B , Cohen B. A, Deahl, K. . Fry, W. E. (1993). Migration from northern Mexico as probable cause of recent genetic changes in populations of *Phytophthora infestans* in the United States and Canada. Phytopathology 84: 553-558.

Hansen K. and Pfister D.H. (2006). Systematics of the Pezizomycetes – the operculate discomycetes. Mycologia 98: 1029-1040.

Hattingh M.J, Roos I.M.M, Mansvelt E.L (1989). Infection and systemic invasion of deciduous fruit trees by *Pseudomonas syringae* in South Africa. Plant Dis 73: 784-789.

Hirano S.S, Rouse D.I, Clayton M.K, Upper C.D (1995). *Pseudomonas syringae* pv *syringae* and bacterial brown spot of snap bean : a study of epiphytic phytopathogenic bacteria and

associated disease. *Plant Dis* 79: 1085- 1093.

Nasraoui B. (2006). les champignons parasites des plantes cultivées. Biologie, systématique, pathologie, maladies : pathologie (3ème partie) Ed. OPU. Tunisie : 317-349.

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.

Vergne E. (2007). Analyse des systèmes inductibles et préformés de défense du riz à *Magnaporthe oryzae* au travers de l'expression de gènes. Thèse en biologie intégrative des plantes, Université Montpellier II, Montpellier, 273 p.

Schoch C.L, Shoemaker R.A, Seifert K.A., Hambleton S, Spatafora J.W, Crous P.W. (2006). A multigene phylogeny of the Dothideomycetes using four nuclear loci. *Mycologia* 1043-1054.

Seyyed-Alireza E, Izadi-Naderi M , Naderi M. (2015). Virescence of floral organs in 'Salvia officinalis': A new mutation. *Iranian Journal of Plant Physiology*, 2(1), 1-5.

Yaganza E.S. (2005). Utilisation post-récolte de sels organiques et inorganiques pour lutter contre la pourriture molle de la pomme de terre : base physico-chimique. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada.