

*République algérienne démocratique et populaire Ministère de l'enseignement supérieur et de
la recherche scientifique*

*Université des Sciences et Technologie, Mohamed Boudiaf, Oran
Faculté des Sciences de la nature et de la vie
Département de Biotechnologie*



Polycopie pédagogique :Cours

Module : Phytopathologie

Enseignante : Gharbi Samia

Maitre des Conférences A

Année universitaire 2021-2022

Sommaire

1.	INTRODUCTION.....	1
2.	HISTOIRE DE LA PHYTOPATHOLOGIE.....	1
3.	LES DIFFERENTS TYPES DE MALADIES	2
4.	MALADIESINFECTIEUSES(BIOTIQUES) :.....	3
4.1.	LES PROTISTES.....	5
4.2.	CHAMPIGNONS	6
4.2.1.	<i>Organisation et structure des champignons</i>	<i>8</i>
4.2.2.	<i>Caractéristiques du groupe et diversité.....</i>	<i>9</i>
4.3.	REPRODUCTION	9
4.3.1.	<i>La reproduction asexuée</i>	<i>9</i>
4.3.2.	<i>La reproduction sexuée</i>	<i>10</i>
4.4.	LES TYPES DE FECONDATION	10
4.5.	CYCLE DE REPRODUCTION.....	11
4.5.1.	<i>Génération :</i>	<i>11</i>
4.5.2.	<i>Lacroissancedumycélium</i>	<i>13</i>
4.5.3.	<i>Conditions de développement</i>	<i>13</i>
4.5.3.1.	<i>Saprophytisme (ounécrotrophie) :</i>	<i>14</i>
5.	DESCRIPTION SIMPLIFIEE DE LA REPRODUCTION SEXUEE DE RHIZOPUS	14
6.	CLASSIFICATION ET PHYLOGENIE.....	15
6.1.	CYCLE BIOLOGIQUE DE RHIZOPUS	16
6.2.	DESCRIPTION SIMPLIFIEE DE LA REPRODUCTION DES BASIDIOMYCETES.....	19
6.2.1.	<i>Cycle de vie de Basidiomycètes</i>	<i>19</i>
7.	IDENTIFICATION DES CHAMPIGNONS	21
8.	LES PRINCIPES D'UNE CLASSIFICATION	21
8.1.	LE SECOND PRINCIPE.....	22
9.	CLASSE DES CHYTRIDIOMYCETES.....	23
9.1.	CLASSE DES ZYGOMYCETES	25
9.2.	CLASSE DES ASCOMYCETES	26
9.3.	CLASSE DES BASIDIOMYCETES.....	27
9.4.	DEUTEROMYCETES OU CHAMPIGNONS ANAMORPHIQUES	30
9.4.1.	<i>Pathologie de la fusariose vasculaire</i>	<i>32</i>

10.	MOYENS DE LUTTE	34
10.1.	LUTTE GENETIQUE	35
10.2.	LUTTE CULTURALE	35
10.3.	LUTTE BIOLOGIQUE.....	35
10.4.	LUTTE CHIMIQUE	36
10.5.	LA LUTTE GÉNÉTIQUE	36
10.5.1.3.	<i>PHYTOPHTHORA INFESTANS</i>	43
	BACTERIES PHYTOPATHOGENES.....	59
	BIOLOGIE DES BACTERIES PHYTOPATHOGENES	59
	CARACTERES GENERAUX (BACTERIES ET MOLLICULITES) PHYTOPATHOGENES.....	62
	TAXONOMIE	63
	NIVEAUX RANG TAXONOMIQUE NOMENCLATURE	63
	CYCLE PARASITAIRE DES BACTERIES.....	65
10.6.	PSEUDOMONAS SYRINGAE E. F. SM.	69
10.7.	XANTHOMONAS.....	71
	LES MALADIES PROVOQUEES PAR DES VIRUS.....	74
	UN PEU D'HISTOIRE	74
	CLASSIFICATION DES VIRUS DES PLANTES	75
	NATURE ET CONSTITUTION DES VIRUS	78
	TRANSMISSION ET PENETRATION.....	79
	LE PROCESSUS D'INFECTION VIRALE.....	80
	AU NIVEAU CELLULAIRE (CAS GENERAL DES VIRUS A ARN SIMPLE BRIN).....	81
	TRADUCTION ET REPLICATION DU GENOME VIRAL	81
	AU NIVEAU TISSULAIRE.....	82
	MULTIPLICATION DANS LA PLANTE	83
	SYMPTOMES	83
	CONSERVATION.....	84
	DETECTION ET IDENTIFICATION	84
	MOYENS DE LUTTE.....	84
	LES PHYTOVIRUS	85

VIROSES TRANSMISES PAR LES PUCERONS.....	88
JAUNISSE NANISANTE DE L'ORGE (BARLEY YELLOW DWARF VIRUS)	88
RAYURE VIRALE FREE STATE	88
AUTRES VIROSES TRANSMISES PAR LES PUCERONS	89
VIROSES TRANSMISES PAR LES CICADELLES.....	89
STRIURE VIRALE AMERICAINE DU BLE.....	90
VIROSES TRANSMISES PAR LES FULGORIDES.....	90
HOJA BLANCA DU RIZ.....	90
BIGARRURE VIRALE AFRICAINE DES CEREALES	90
MOSAÏQUE STRIEE EUROPEENNE DU BLE	91
AUTRES VIROSES TRANSMISES PAR LES FULGORIDES	91
VIROSES TRANSMISES PAR LES ACARIENS.....	91
MOSAÏQUE STRIEE DU BLE.....	91
MOSAÏQUE DE L'AGROPYRON ET MOSAÏQUE DU RAY-GRASS	92
MOSAÏQUE TACHETEE DOUBLE	92
VIROSES TRANSMISES PAR LE SOL	92
MOSAÏQUE DU BLE TRANSMISE PAR LE SOL (WHEAT SOIL-BORNE MOSAIC VIRUS. WSBMV).....	92
FILOSITE-BIGARRURE DU BLE	93
VIROSES TRANSMISES PAR LA SEMENCE.....	93
MOSAÏQUE DE L'ORGE	93
1. LES NEMATODES PHYTOPARASITES.....	94
2. LA SYSTEMATIQUE DES NEMATODES.....	95
2.1. LA SOUS-CLASSE DES PHASMIDIA	95
2.2. LA SOUS-CLASSE DES ADENOPHOREA(= APHASMIDIA)	96
3. LES NEMATODES DES RACINES :.....	96
4. LES NEMATODES DES PARTIES AERIENNES :.....	97

1. Introduction

La phytopathologie se définit comme étant l'étude des facteurs biotiques et abiotiques qui sont responsables de provoquées les maladies, parmi ces facteurs biotiques en trouve les champignons, bactéries, virus, nématodes, des plantes parasites et des facteurs abiotiques formes de stress exercés par des facteurs environnementaux qui induisent des maladies chez les plantes, des mécanismes par lesquels ces différents éléments agissent et des méthodes de prévention ou de contrôle des maladies.

Le contrôle des maladies induit donc une qualité accrue des produits souvent accompagnée d'un prix plus élevé dû aux coûts de recherche et de développement. Depuis un siècle, le contrôle des maladies des plantes s'est principalement effectué par l'utilisation massive des pesticides qui s'avèrent toxiques non seulement pour les pathogènes, les plantes mais aussi les consommateurs. Les implications à court et long terme de ces utilisations abusives restent encore difficiles à évaluer. Ainsi, le but majeur du contrôle actuel des maladies de plantes tend à utiliser des approches combinées de génie-génétique, des élections naturelles, de cultures successives et l'utilisation d'agents biologiques antagonistes des microorganismes causals. De plus, l'augmentation de la population couplée à la diminution des terres cultivables provoqueront l'avènement de cette science dans les prochaines décennies.

2. Histoire de la phytopathologie

La phytopathologie a «commencé» dès les origines de l'agriculture, il y a environ 9000 ans, où la protection des cultures (écosystèmes artificiels) contre les mauvaises herbes, ravageurs et maladies était essentielle pour la survie des individus. Les ravageurs et mauvaises herbes, facilement identifiables étaient aisés à éliminer alors que les maladies furent très longtemps attribuées à des origines divines.

En 1807, Prévost démontre que le champignon *Tilletia caries* est à l'origine de la carie du blé et préconise le traitement des semences par le sulfate de cuivre.

En 1845 et 1846, l'Irlande est touchée par le Mildiou de la pomme de terre, aliment principal du pays, la famine provoque des centaines de milliers de victimes et l'émigration de millions d'Irlandais vers les Etats-Unis.

En 1846, Berkeley montre que le mildiou est causé par le développement d'un champignon parasite. Des maladies de la vigne font leur apparition en Europe à la même époque,

En 1847, l'oïdium fait son apparition en Grande-Bretagne puis s'étend très vite à toute l'Europe.

En 1861, l'allemand Anton de Bary écrit de nombreux champignons phytopathogènes.

En 1878, les plantations de caféiers sont ravagées par la rouille.

En 1898, Beijerinck pense que l'agent responsable de la mosaïque du tabac est un fluide « contagium vivum fluidum ».

En 1904, Erwin F. Smith isole la bactérie *Agrobacterium tumefaciens* l'agent de la galle du collet (« crown gall ») chez les dicotylédones. La recherche sur les virus reste très difficile.

En 1926, le virus est décrit comme une particule isostable puis est cristallisé en 1935 par Stanley.

En 1936, Bawden montrent que les cristaux sont principalement constitués de protéines et renferment de l'ARN. En 1939, le VMT est observé en microscopie électronique.

Ce n'est qu'en 1956 que l'on démontre que l'ARN viral renferme l'information génétique.

En 1971, Diener découvre les viroïdes spécifiques du règne végétal.

3. Les différents types de maladies

L'avantage de cette dernière classification réside dans le fait qu'elle permette de déterminer la cause de la maladie, son probable développement, les risques d'épidémie et les mesures de contrôle à prendre. On peut donc classer les maladies de plantes comme suit :

Maladies infectieuses (biotiques) :

- ✓ Des champignons.
- ✓ Des procaryotes (bactéries et mollicutes).
- ✓ Des plantes supérieures parasites.
- ✓ Des virus et viroïdes.
- ✓ Des nématodes.
- ✓ Des protozoaires.

Maladies non parasitaires (abiotiques) :

- ✓ Températures trop basses ou trop hautes.
- ✓ Manque ou excès d'humidité.
- ✓ Manque ou excès de lumière.
- ✓ Manque d'oxygène.
- ✓ Pollution atmosphérique.
- ✓ Déficiences nutritionnelles.
- ✓ Toxicité minérale.
- ✓ Acidité ou alcalinité du sol.
- ✓ Toxicité des pesticides.
- ✓ Mauvaises pratiques culturales

4. Maladies infectieuses (biotiques) :

La place des microbes parmi les êtres vivants

Les protistes ou Microbes : on donne le nom de Protistes ou de Microbes aux êtres unicellulaires et aux organismes multicellulaires mais dénués de différenciation tissulaire, c'est-à-dire dont les cellules végétatives, soit individualisées, soit confondues dans une

structure coenocytique (mycélium), sont toutes équivalentes et ne présentent pas de spécialisation fonctionnelle.

Chez les protistes, comme chez les animaux et végétaux supérieurs, l'unité structurelle élémentaire est la cellule, entité dont les caractères fondamentaux, longtemps définis d'une manière purement descriptive, peuvent maintenant être énoncés en termes chimiques et décrits à l'échelle moléculaire.

Toute cellule possède un noyau, dans lequel est situé l'acide désoxyribonucléique (ADN), substratum du pouvoir héréditaire de reproduction conforme, et un cytoplasme, contenant des protéines diverses, douées d'activités enzymatiques, et où s'effectue la synthèse de ces protéines par un processus faisant intervenir un autre type d'acide nucléique, les acides ribonucléiques (ARN). D'autre part, la cellule contient toujours une grande variété de protéines enzymatiques ayant pour fonctions de produire de l'énergie biologiquement utilisable, sous forme d'adénosine triphosphate (ATP), et de synthétiser les différents constituants organiques de la cellule à partir de composés chimiques fournis par le milieu extérieur.

La reproduction cellulaire est caractérisée par le fait qu'elle s'opère par division et que celle-ci est précédée par la synthèse de tous les constituants de la cellule.

Cet ensemble de caractères distingue la cellule d'une autre entité biologique, le virus. Comme on le verra de façon plus détaillée dans le chapitre III consacré à la virologie, la particule virale infectante ou virion contient un seul type d'acide nucléique, soit ADN, soit ARN, qui détient l'information génétique pour la reproduction conforme du virus. Cet acide nucléique est enfermé et protégé dans une coque protéique, *la capside*, parfois elle-même est protégé dans une deuxième enveloppe protéique, *le péplos ou manteau*. Cependant, le virion ne comporte pas de protéines douées d'activités enzymatiques, ou celles qu'il contient sont en petit nombre et exclusivement destinées à son attachement sur la cellule-hôte et à la pénétration dans celle-ci de son matériel héréditaire.

Dépourvu de système enzymatique producteur d'énergie, le virion ne peut croître ni se reproduire de façon autonome. Son mode d'existence, auquel on donne le nom de *paratrophie*, est obligatoirement parasite et intracellulaire, (la cellule qu'il infecte lui procure les matériaux, les outils et l'énergie nécessaire à la synthèse de son acide nucléique et de ses protéines spécifiques. En d'autres termes, le caractère fondamental du virion est sa reproduction à partir du seul matériel génétique) (Senez, 1968).

4.1. Les protistes

Les protistes comprennent des organismes très divers, dont les plus complexes se rattachent de façon évidente soit du Règne animal soit au Règne végétal. En ce qui concerne les plus simples, par contre, leurs relations phylogéniques avec les autres êtres vivants ont fait l'objet de nombreuses controverses et sont longtemps demeurées imprécises.

L'existence d'une parenté biologique entre les algues bleu-vert ou Cyanophycées et les bactéries avait été reconnue par plusieurs auteurs et notamment par Ferdinand Cohn, dès la fin du XIX^{ème} siècle. Toutefois, c'est à Edouard Chatton (1932) qu'on doit d'avoir établi entre ces Protistes inférieurs et les Protistes supérieurs une distinction fondamentale, tenant à la structure élémentaire de la cellule, et de leur avoir respectivement donné les noms de *Procaryote* et d'*Eucaryote*. Pour cet auteur les caractères distinguant la cellule procaryotique de la cellule eucaryotique étaient essentiellement l'absence de noyau morphologiquement distinct et d'organites intracytoplasmiques (chondriome, chloroplastes) et sa reproduction, alors considérée comme toujours amitotique et asexuée.

Par la suite, ces caractères ont été révisés et complétés grâce aux progrès de la génétique microbienne, de la chimie des macromolécules biologique et de la microscopie électronique.

Tableau 1: Principaux caractères cytologiques des Eucaryotes et des Procaryotes

	<i>Eucaryotes</i>	<i>Procaryotes</i>
<i>Noyau</i>	<i>Entouré par une membrane propre Plusieurs chromosomes (Cellules végétales di ou polyploïde) Division par mitose Méiose</i>	<i>Pas de membrane nucléaire Un seul chromosome (un seul groupe de liaisons de gènes) Pas de mitose Pas de méiose</i>
<i>ADN</i>	<i>Lié à des protéines basiques (histones)</i>	<i>Pas d'histones, mais ADN probablement lié à des polyamines</i>
<i>Paroi cellulaire</i>	<i>Pas de complexe muco-peptidique Paroi absente (animaux) Cellulosique (végétaux) Chitine (champignons)</i>	<i>Complexe muco-peptidique, contenant des acides D-amines et de l'acide di-amino-pimélique (ou L-lysine).</i>
<i>Stérols</i>	<i>Entrent dans la constitution de toutes les membranes interne</i>	<i>Absents</i>
<i>Synergons respiratoires</i>	<i>Mitochondries</i>	<i>Absentes ou rudimentaires (mésosomes)</i>
<i>Synergons photosynthétiques</i>	<i>Chloroplastes</i>	<i>Organites lamellaires ou vésicules (chromatophores)</i>
<i>Mouvements amiboïdes</i>	<i>Présents ou absents</i>	<i>Toujours absents</i>
<i>Organes locomoteurs</i>	<i>Cils de structure complexe, comportant plusieurs filaments</i>	<i>Cils formés d'un filaments unique (Eubactéries), ou filament axial (Spirochètes)</i>

(Senez, 1968).

4.2. *Champignons*

Les *champignons* sont caractérisés par une organisation générale rudimentaire: leur appareil végétatif ou *mycélium* est constitué de *filaments* plus ou moins ramifiés sur les quels se différencient, le moment venu, les organes de dispersion et de reproduction.

Chez les plus archaïques, ces filaments ont une structure cénocytique, c'est-à-dire qu'ils contiennent de nombreux noyaux non séparés les uns des autres: *siphons* mycéliens.

L'apparition de cloisons isolant les noyaux aboutit aux *hyphes* cloisonnés des *Ascomycotina* et *Basidiomycotina*.

Les hyphes et siphons croissent par leur *apex*; en arrière des apex et de manière plus ou moins ordonnée se produisent des bourgeonnements à l'origine des *ramifications* tandis que des *anastomoses* entre filaments mailaient l'ensemble.

Les ramifications correspondent à la néoformation de nouveaux axes à croissance linéaire. Le nombre des ramifications produites dépend de l'intensité de l'alimentation. Sur un milieu de culture riche, non limitant, ce nombre augmente exponentiellement: la formation de nouvelles ramifications est alors équivalente aux nouvelles cellules produites par division chez une levure ou chez une bactérie.

Les anastomoses résultent de la multiplication des filaments néoformés: quand un nouvel axe bute sur un déjà formé, ils' anastomose au précédent. Les anastomoses assurent les interconnexions entre hyphes et siphons: elles permettent le passage de nutriments, voire d'organites ; elles permettent un développement *synchrone* de l'ensemble du mycélium (Bouchet, Guignard, Pouchus, & Villard, 2005).

Les champignons, appelés aussi mycètes, sont des organismes eucaryotes uni- ou pluricellulaires, incluant des espèces macroscopiques (macromycètes) et d'autres microscopiques (micromycètes), d'aspect filamenteux ou levuriforme. Cosmopolites, ils sont retrouvés partout dans la nature. Ils jouent un rôle essentiel de recyclage des matières organiques en puisant leur énergie à partir des sources carbonées externes (hétérotrophie).

Dans la classification du monde du vivant, les champignons constituent aussi un règne à part, distinct de celui des plantes ou des animaux.

Leur particularité morphologique est d'être étroitement liés à leur substrat nutritif grâce à un réseau mycélien très développé.

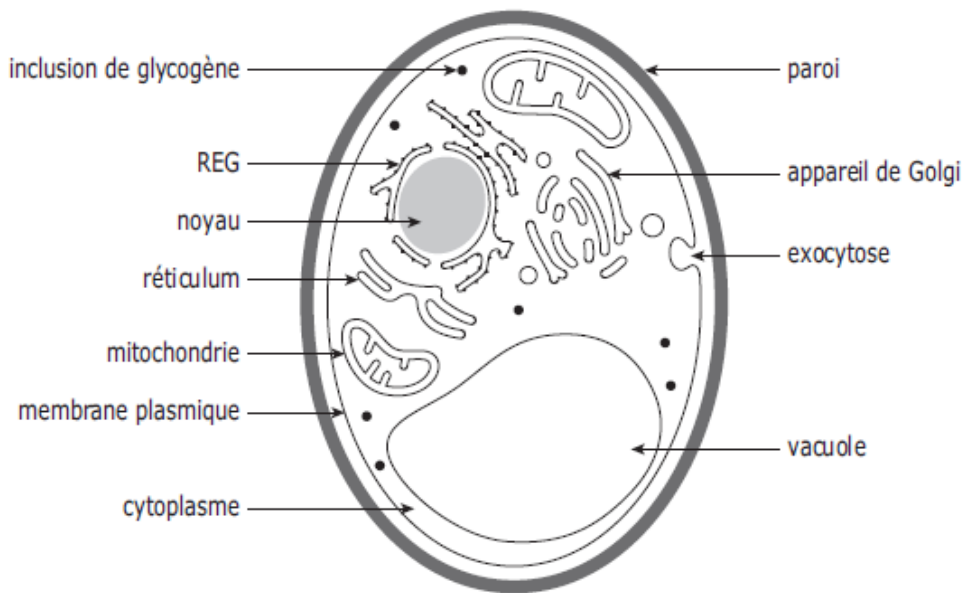
Sur un plan biochimique, les champignons sont caractérisés par la présence d'une paroi constituée essentiellement de polysaccharides, notamment des glucanes et de la chitine.

L'ergostérol constitue le principal stérol de leur membrane, et la synthèse de la lysine s'effectue par la voie de l'acide aminoadipique. Une autre de leur caractéristique remarquable est leur reproduction. Ils produisent en effet un grand nombre de spores, ce qui

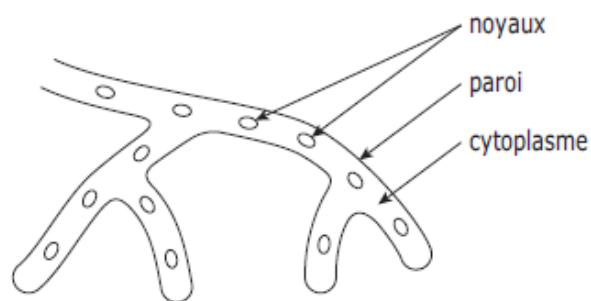
leur assure un pouvoir de diffusion (et de contamination) considérable (Chabasse, Bouchara, de Gentile, Brun, Cimon, & Penn, 2002).

4.2.1. Organisation et structure des champignons

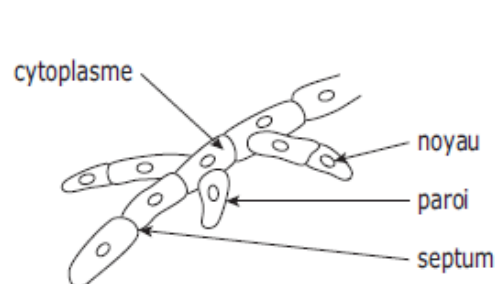
Chez les champignons l'appareil végétatif est appelé le thalle, il est formé de cellules eucaryotes qui se caractérisent par l'existence d'une paroi rigide externe constituée principalement de polysides dont de la chitine, de la callose et des hémicelluloses, ainsi que par celle d'une grande vacuole cytoplasmique.



Chez les champignons filamenteux (moisissures) le thalle forme des filaments appelés hyphes qui peuvent être droits ou ramifiés. Certaines de ces hyphes sont cloisonnées (ou septées) alors que d'autres ne possédant pas de septum forment en quelque sorte une longue cellule continue (on parle de structure en siphon). Même lorsque les hyphes sont cloisonnés les septums présentent des ouvertures par lesquelles le cytoplasme put circuler librement,



Mycélium non cloisonné



Mycélium cloisonné

sauf au niveau des cellules reproductrices. L'ensemble des hyphes porte le nom de mycélium.

Chez les levures, qui sont unicellulaires, le thalle est constitué de cellules ovoïdes qui peuvent former des colonies (issues du bourgeonnement des levures) ou dans certains cas des filaments appelés pseudo-mycéliums.

4.2.2. Caractéristiques du groupe et diversité

Ils sont eucaryotes (organismes possédant des cellules munies d'un noyau).

Ils sont hétérotrophes vis-à-vis du carbone, qu'ils doivent trouver dans leur environnement immédiat.

Ils sont organotrophes, ils se nourrissent de composés organiques. Ils sont absorbotrophes, se nourrissant par absorption. Ils développent un appareil végétatif appelé mycélium.

Ils se reproduisent par des spores Ces spores sont flagellées ou non.

Ils ont une paroi cellulaire chitineuse (ou calleuse, ou callo-chitineuse).

La plupart sont saprophytes, ils se nourrissent de matières organiques végétales ou animales en décomposition (Tanguy, 2015).

4.3. *Reproduction*

Les champignons peuvent se reproduire soit de manière asexuée soit de manière sexuée.

4.3.1. La reproduction asexuée

La reproduction asexuée se fait soit par bourgeonnement pour les levures soit par fragmentation du mycélium chez les champignons filamenteux ou encore par formation de spores asexuées. Les spores asexuées se différencient au niveau d'organes de fructification spécialisés qui sont des sporanges (structure en forme de sac à l'intérieur de laquelle se

forment les spores qui sont libérées par éclatement des sporanges) ou des conidiophores (dans ce cas les spores se forment à la surface de l'organe de fructification).

4.3.2. La reproduction sexuée

La reproduction sexuée se fait par fusion de deux cellules haploïdes issues du thalle, elle comprend trois phases successives :

La plasmogamie (fusion des cytoplasmes),

La caryogamie (fusion des noyaux) qui donne naissance au zygote et

La méiose qui rétablit l'haploïdie et permet de former des spores sexuées.

La grande majorité des spores, qu'elles soient issues de la reproduction sexuée ou asexuée, ne sont pas mobiles (quelques champignons produisent des spores flagellées mobiles appelées zoospores). Elles sont disséminées sur de longues distances soit par le vent soit par l'intermédiaire d'insectes ou de petits animaux.

4.4. Les types de fécondation

On utilise le terme de gamie pour désigner la fusion entre des gamètes on y distingue plusieurs formes :

Isogamie : fusion entre deux gamètes de même taille et identique - Anisogamie = fusion entre deux gamètes de tailles différentes

Oogamie : Fécondation mettant en présence un gamète mâle petit, mobile produit en grand nombre (anthérozoïdes) et un gamète femelle gros, immobile (oosphère anisogamie trop prononcée

Cystogamie : conjugaison, union entre deux cellules jouant le rôle de gamétocystes, un tube de conjugaison s'établit entre les deux cellules.

Trichogamie : elle est caractérisée par le fait que les spermaties, gamètes males encore très nombreuses mais inertes se fixe sur le trichogyne (trichos = poil mucilagineux qui est long, un prolongement terminal du carpogone).

Thallogamie : deux filaments haploïdes fusionnent mais les deux noyaux persistent. Il existe deux types de thalles haploïdes (notés + et -) qui s'attirent mutuellement. Ces thalles se présentent comme des siphons (hyphes non cloisonnées). Leur rencontre aboutit à la production de gamétocystes au sein desquels sont produits des gamètes

4.5. Cycle de reproduction

Cycle de vie = cycle biotique = cycle biologique = cycle vital = cycle de reproduction = cycle de développement = ensemble cyclique du déroulement de la vie d'un organisme eucaryote impliquant une reproduction sexuée, avec méiose et fécondation.

Phase : épisode chromosomique associé à un cycle de reproduction, pouvant être :

Haploïde (haplophase) : Si la fécondation est immédiatement suivie d'une méiose (le zygote la subit immédiatement) : cycle haplophasique (ou haplobiontique, ou haploïde).

Diploïde (diplophase) : Si la méiose est immédiatement suivie de la fécondation (sans mitoses) : cycle diplophasique (ou diplobiontique, ou diploïde).

4.5.1. Génération :

L'étape du cycle vital comprenant au moins une mitose (développement végétatif). Elle va du zygote ou d'une spore jusqu'à la production de gamètes ou de spores après un épisode végétatif plus ou moins long (pas de génération si fécondation juste après méiose, ou si méiose juste après fécondation).

Si 1 génération dans le cycle : monogénétique,

Si 2 générations dans le cycle : digénétique,

Si 3 générations dans le cycle : trigénétique.

Les cycles digénétiques : alternance de deux générations.

La première génération est constituée de cellules haploïdes (n chromosomes). Au sein de ses organes reproducteurs, elle élabore par simples mitoses des cellules reproductrices à n chromosomes : les gamètes.

Cette génération est donc le gamétophyte (végétal qui génère les gamètes). La fusion d'un gamète mâle et d'un gamète femelle (=fécondation ou gamie) donne naissance à un œuf (=zygote) diploïde dans les divisions successives par mitose sont à l'origine d'un organisme à cellules diploïdes qui représentent la seconde génération.

Celle-ci forme par méiose (réduction chromatique) dans ses organes reproducteurs des cellules haploïdes appelés spores. Cette génération est donc le sporophyte. Chacune des spores, par mitoses successives, se développera en un nouveau gamétophyte haploïde.

Il y a alternance de deux générations ;

L'une sexuée représentée par le gamétophyte (n) qui fournit les gamètes. il existe des gamétophytes mâles et femelles.

L'autre asexuée représentée par le sporophyte (2n) qui fournit les spores.

Les cycles monogénétiques : disparition de l'une ou l'autre des deux générations. Il existe un seul type de thalle qui peut être :

Haploïde (n chromosomes) : Cycle monogénétique haplophasique.

Diploïde (2n chromosomes) : Cycle monogénétique diplophasique.

Les cycles trigénétiques : apparition d'une troisième génération

1ère génération : gamétophyte haploïde (n) -----> gamètes (n)

2ème génération : sporophyte diploïde (2n) --mitose---> spores (2n)

3ème génération : sporophyte diploïde (2n) -- méiose---> spores méiotiques (n).

Les générations peuvent être semblables morphologiquement (cycle isomorphe = homomorphe) ou dissemblables (cycle hétéromorphe).

4.5.2. La croissance du mycélium

Le mode de croissance du mycélium fait que celui-ci est *limité à l'apex* des hyphes et des siphons: croissance et assimilation des nutriments sont concomitantes.

Ce couplage est logique: d'une part, la croissance utilise l'énergie des métabolites provenant du substrat et, d'autre part, la croissance n'est *mécaniquement* possible, surtout si elle se produit dans les trois dimensions, que si le substrat est désorganisé et consommé au moins partiellement.

Aussi le champignon explore-t-il son substrat et son *extension* est la condition de sa survie.

Lorsque les éléments nutritionnels ne sont plus fournis de façon équilibrée le champignon ralentit son taux de croissance ou même l'annule : il quitte la « trophophase » et entre en « idiophase »

Les aliments ne sont pas perdus mais mis en réserves ou des formes ayant un potentiel osmotique faible: le carbone est stockés ou forme de *glycogène* ou *d'inclusions lipidiques*, l'azote stocké à l'état d'acides aminés vacuolaires ou de protéines, les phosphores ou forme de *polyphosphates* dont l'électronégativité est compensée par des ions potassium ou de l'arginine(acide aminé basique).

Le *déséquilibre alimentaire* déclenche généralement la *phase reproductrice*(voir ci-dessous) au cours de laquelle les éléments emmagasinés seront utilisés (Bouchet, Guignard, Pouchus, & Villard, 2005).

4.5.3. Conditions de développement

Les champignons sont hétérotrophes, ils se développent donc en utilisant de la matière organique.

Ce qui fait leur particularité – bien que leur source de carbone privilégiée soit les glucides – c'est qu'ils sont capables d'utiliser quasiment n'importe quelle source de matière organique (organismes vivants ou morts ; produits alimentaires : confitures, céréales... ;

produits naturels : bois, pétrole... ; produits manufacturés : papier, tissu, cuir...) grâce à un équipement enzymatique particulièrement divers même si certaines espèces ont une exigence plus stricte vis-à-vis du substrat qu'elles utilisent. Les champignons se procurent leur matière organique selon trois modes :

4.5.3.1.Saprophytisme (ou nécrotrophie) :

Ils se développent aux dépens de la matière organique végétale ou animale en décomposition ce qui permet son recyclage.

4.5.3.2.Parasitisme (ou biotrophie) :

Ils se développent aux dépens d'organismes vivants végétaux (plus rarement animaux).

4.5.3.3.Symbiotisme :

Ils se développent grâce à leur association avec un autre organisme vivant : des plantes ce qui forme les mycorhizes ou des algues ce qui forme les lichens.

5. Description simplifiée de la reproduction sexuée de *Rhizopus*

Il existe deux types de thalles haploïdes (notés + et -) qui s'attirent mutuellement. Ces thalles se présentent comme des siphons (hyphes non cloisonnées). Leur rencontre aboutit à la production de gamétocystes au sein desquels sont produits des gamètes.

Il y a ensuite *fécondation par fusion des gamétocystes* + et - (cystogamie), ce qui aboutit à un coenozygocyste (= zygosporocyste) où les noyaux fusionnent deux à deux (caryogamie), mais *un seul noyau diploïde persiste* ; celui-ci subit la *méiose immédiatement* (figure 2) retour immédiat à l'haploïdie : le cycle est monogénétique) et *un seul des noyaux haploïdes subsiste*, devenant une zygospore.

Cette *zygospore germe* et produit un zygosporocyste renfermant des zygospores produites par *mitoses*. Ces spores *germent et produisent les hyphes* de la Moisissure, pouvant *se multiplier végétativement* sans reproduction sexuée (Tanguy, 2015).

6. Classification et phylogénie

Le règne des champignons comprend des divisions, elles-mêmes subdivisées en classes. Celles-ci englobent les ordres qui rassemblent les familles. Les noms se terminent par : mycotina pour les divisions, mycètes pour les classes. Le suffixe -ale est employé pour désigner les ordres, le suffixe -aceae pour les familles et le suffixe -adeae pour les sous-familles. Une famille comprend des genres qui englobent des espèces, celles-ci peuvent se subdiviser en variétés. Chaque champignon porte un nom qui suit les règles de la nomenclature binomiale (genre et espèce) énoncées par Carl Von Linné au 18e siècle (Chabasse, Bouchara, de Gentile, Brun, Cimon, & Penn, 2002).

Les Eumycètes sont classés en quatre groupes : Chytridiomycètes, Zygomycètes, Ascomycètes et Basidiomycètes. Les relations phylétiques précises sont encore l'objet de débats et controverses (Figure 1) (Tanguy, 2015).

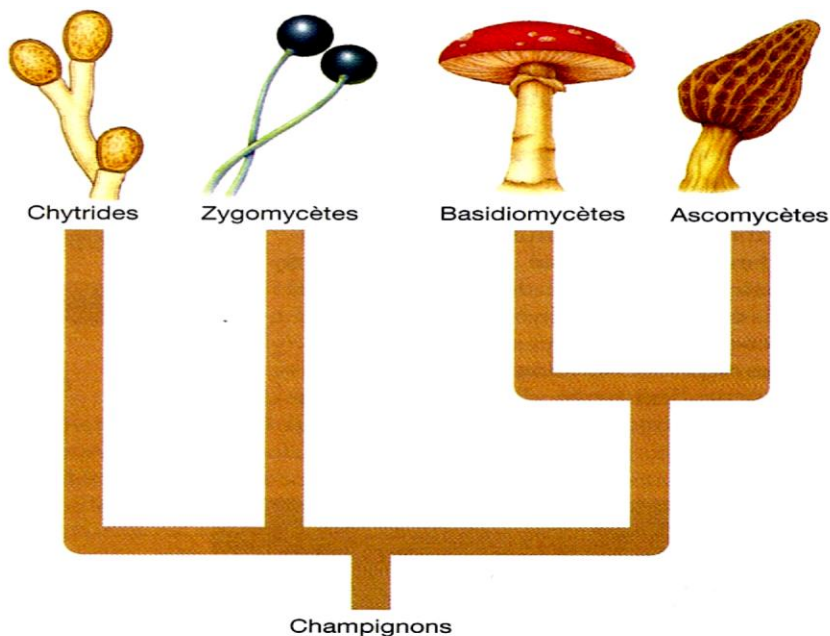


Figure 1: Phylogénie des Eumycètes (Tanguy, 2015)

6.1. Cycle biologique de *Rhizopus*

Il y a ensuite *fécondation par fusion des gamétocystes* + et – (cystogamie), ce qui aboutit à un coenozygocyste (= zygosporocyste) où les noyaux fusionnent deux à deux (caryogamie), mais *un seul noyau diploïde persiste* ; celui-ci subit la *méiose immédiatement*

Retour immédiat à l'haploïdie : le cycle est monogénétique) et *un seul des noyaux haploïdes subsiste*, devenant une zygospore.

Cette *zygospore germe* et produit un zygosporocyste renfermant des zygospires produites par *mitoses*. Ces spores *germent et produisent les hyphes* de la Moisissure, pouvant *se multiplier végétativement* sans reproduction sexuée.

Il existe deux types de thalles haploïdes (notés + et –) qui s'attirent mutuellement. Ces thalles se présentent comme des siphons (hyphes non cloisonnées).

Leur rencontre aboutit à la production de gamétocystes au sein desquels sont produits des gamètes.

Il y a ensuite *fécondation par fusion des gamétocystes* + et – (cystogamie), ce qui aboutit à un coenozygocyste (= zygosporocyste) où les noyaux fusionnent deux à deux (caryogamie), mais *un seul noyau diploïde persiste* ; celui-ci subit la *méiose immédiatement*

Retour immédiat à l'haploïdie : le cycle est monogénétique) et *un seul des noyaux haploïdes subsiste*, devenant une zygospore.

Cette *zygospore germe* et produit un zygosporocyste renfermant des zygospires produites par *mitoses*. Ces spores *germent et produisent les hyphes* de la Moisissure, pouvant *se multiplier végétativement* sans reproduction sexuée.

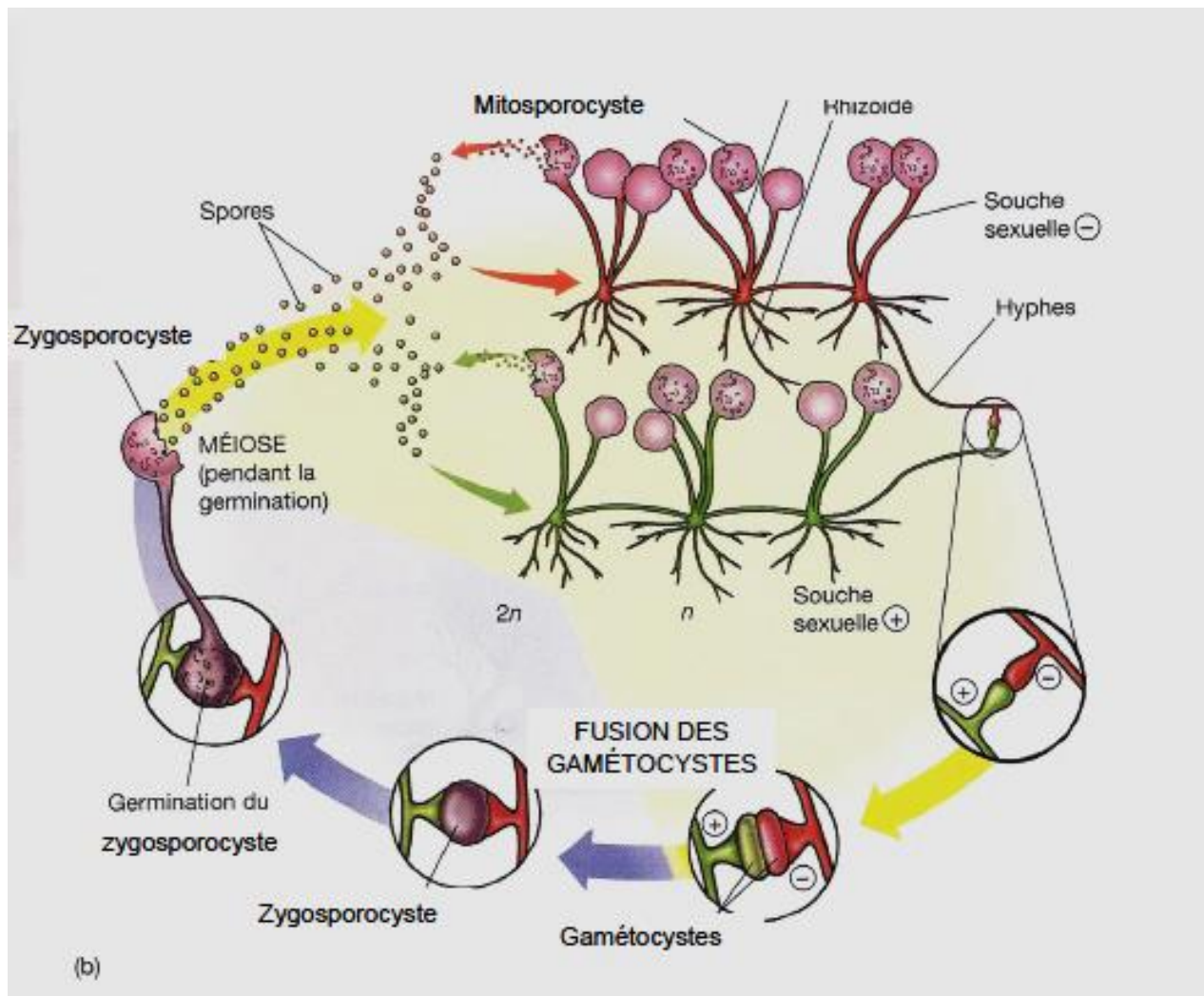


Figure 2: Cycle d'un Zygomycète : *Rhizopus* (Tanguy, 2015)

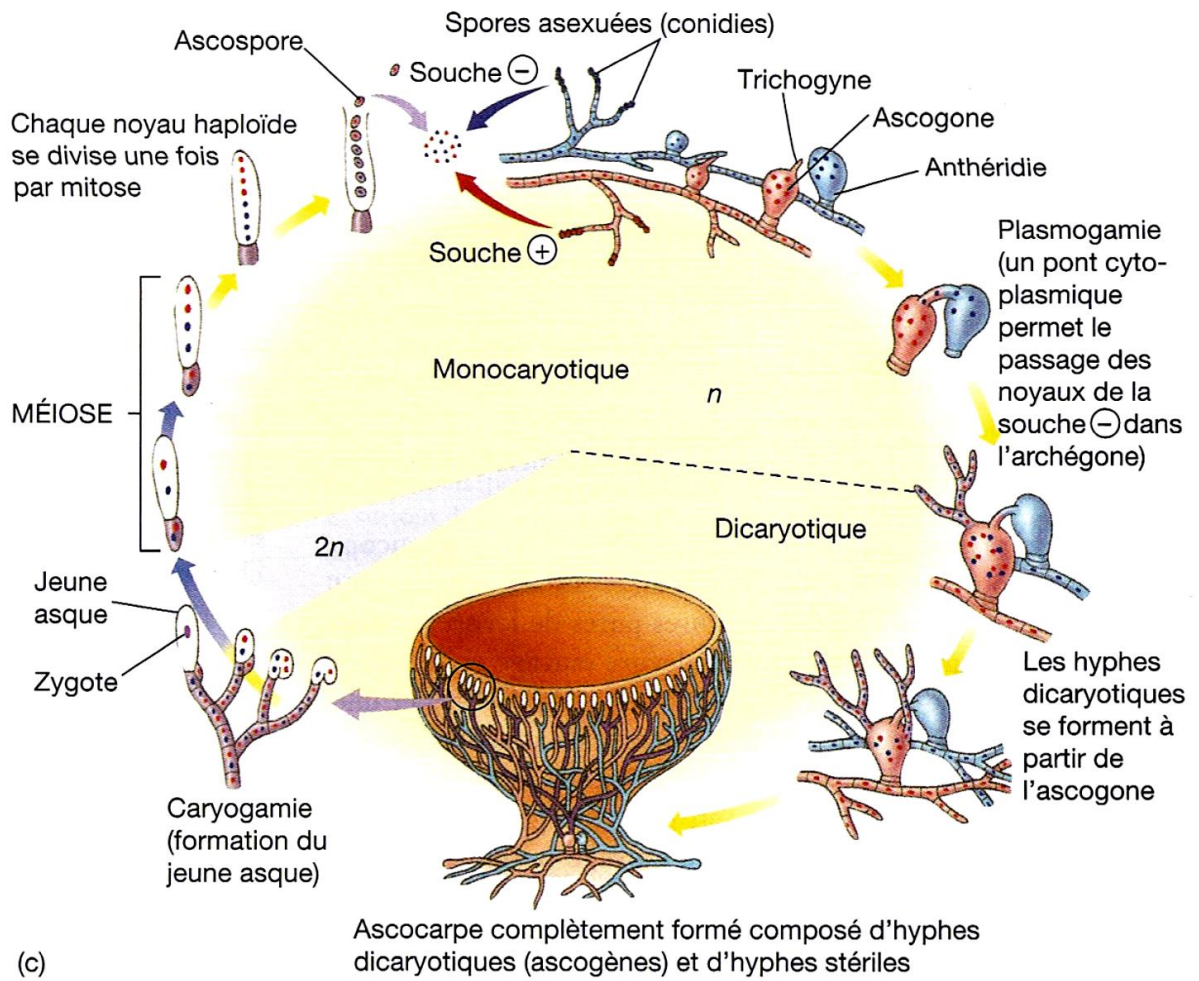


Figure 3: Cycle d'un Ascomycète : Peziza (Tanguy, 2015)

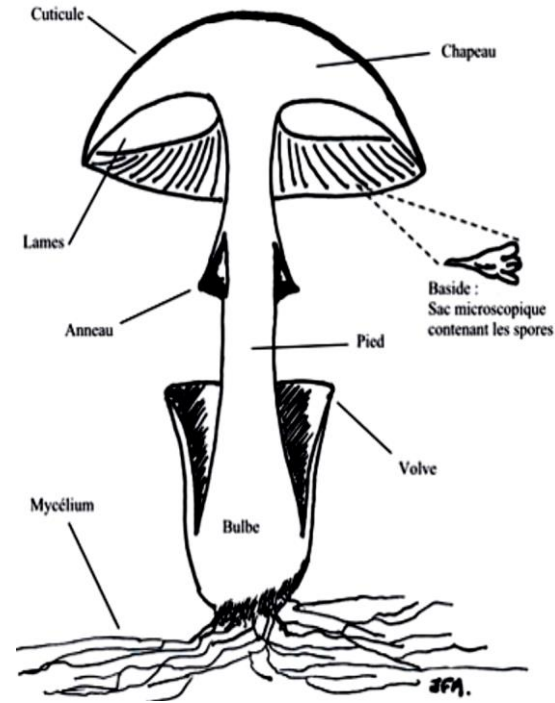
6.2. Description simplifiée de la reproduction des Basidiomycètes

Il existe deux types de thalles haploïdes (notés + et -) qui s'attirent mutuellement. Ces thalles sont composés d'hyphes cloisonnées formant le mycélium primaire.

Leur rencontre aboutit à une *fusion des cytoplasmes* (plasmogamie) sans fécondation. On obtient un mycélium secondaire qui est dicaryotique.

À partir de ce mycélium, se développe un carpophore. À la périphérie des lames du chapeau, il a formation de basides où il y a caryogamie (= fécondation qui donne un zygote diploïde) immédiatement suivie de la méiose qui produit ainsi des basidiospores haploïdes.

Ces spores pourront ensuite germer dans le sol et former un mycélium primaire (Tanguy, 2015)(Figure 4).



6.2.1. Cycle de vie de Basidiomycètes

Il existe deux types de thalles haploïdes (notés + et -) qui s'attirent mutuellement. Ces thalles sont composés d'hyphes cloisonnés Description simplifiée de la reproduction des Basidiomycètes formant le mycélium primaire.

Leur rencontre aboutit à une *fusion des cytoplasmes* (plasmogamie) sans fécondation. On obtient un mycélium secondaire qui est dicaryotique.

À partir de ce mycélium, se développe un carpophore. À la périphérie des lames du chapeau, il a formation de basides où il y a caryogamie (= fécondation qui donne un zygote diploïde) immédiatement suivie de la méiose qui produit ainsi des basidiospores haploïdes. Ces spores pourront ensuite germer dans le sol et former un mycélium primaire.

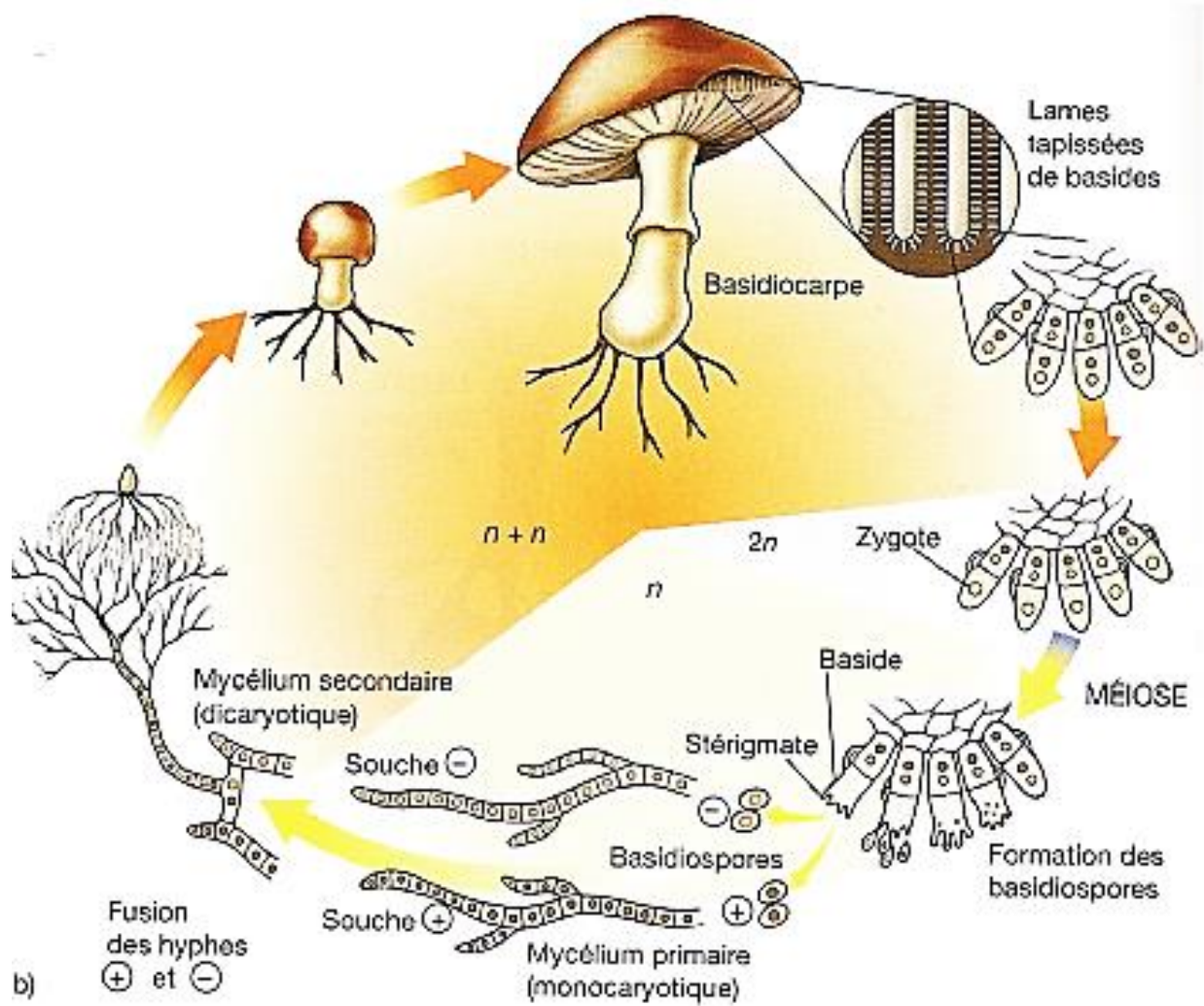


Figure 4: Cycle de vie des Basidiomycètes (Tanguy, 2015)

7. Identification des champignons

L'identification des champignons est essentiellement morphologique. Un micromycète peut parfois se présenter sous différentes formes : une forme sexuée ou téléomorphe et une forme asexuée ou anamorphe, les deux formes portant des noms différents. Lorsque plusieurs aspects coexistent pour la forme asexuée, on parle de synanamorphes. Lorsque l'espèce fongique existe dans la même culture sous forme sexuée et asexuée, on parle d'holomorphe. En pratique, lorsqu'un champignon est découvert en culture, il portera le nom de la forme isolée. Lorsqu'il existe sous les deux formes (anamorphe et téléomorphe), c'est le nom de la forme sexuée qui sera retenu en priorité (Chabasse, Bouchara, de Gentile, Brun, Cimon, & Penn, 2002)

8. Les principes d'une classification

C'est à Linné que revient le mérite d'avoir le premier (1753) proposé les principes d'une classification "dite naturelle" du monde végétal et animal.

Le premier principe

Il veut que tout individu appartienne à une espèce. L'espèce, donc, est considérée comme la base de la construction de tout édifice taxonomique, elle est l'unité taxonomique.

L'espèce : individus semblables dans la morphologie, ils occupent une région géographique déterminée, et s'il y a sexualité, l'inter fécondation, entre eux, transmet à leur descendance leur patrimoine génétique.

Le genre : espèces étroitement apparentées et très homogènes. Les genres sont réunis en famille :

La famille : genres manifestant des rapports morphologiques grands, des similitudes et une distribution géographique plus ou moins localisée. Les familles sont regroupées en ordre. La famille est scindée en genres, mais, éventuellement, elle peut être scindée en taxons intermédiaires les sous-familles ou tribus.

L'ordre : familles présentant des affinités manifestes et pour lesquelles on peut admettre une origine phylogénétique commune. Les ordres sont regroupés en classe. L'ordre est scindé en familles, mais, éventuellement, il peut être scindé en taxons intermédiaires les sous-ordres.

La classe : ordres présentant, dans leur organisation, des affinités communes larges. La classe est à son tour divisée en ordres. Les classes sont regroupées en embranchement. La classe est scindée en ordres, mais, éventuellement, elle peut être scindée en taxons intermédiaires les sous-classes ou super-ordres.

L'embranchement : est un niveau hiérarchique de la classification réunissant des classes dérivant toutes d'un ancêtre commun. Les embranchements se sont différenciés très tôt, certains dès l'époque précambrienne. Les embranchements sont regroupés en règnes. Il existe parfois un niveau intermédiaire entre ceux de l'embranchement et du règne, celui du superembranchement. L'embranchement est à son tour divisée en classes, mais, éventuellement, il peut être scindé en taxons intermédiaires les sous-embranchements.

Les terminaisons suivantes indiquent le niveau hiérarchique :

<i>Embranchement</i>	<i>Classe</i>	<i>Ordre</i>	<i>Famille</i>
<i>ta</i>	<i>ceae</i>	<i>ales</i>	<i>aceae</i>

8.1. *Le second principe*

Il veut que chaque espèce soit désignée par deux noms latins qui se suivent. Le premier désigne le nom du genre et le deuxième désigne celui de l'espèce. La nomenclature biologique est donc binominale.

Le nom de l'espèce se termine toujours par :

- a, on met la lettre c avant cette voyelle.
- e, on met la lettre a après cette voyelle.
- toute autre voyelle, on ajoute a après cette voyelle.
- une consonne, on ajoute ia à cette consonne.

Les champignons sont rattachés aux :

Règne des Eucaryotes

Embranchement des Thallophyta

Sous Embranchement des Mycotae.

Classification des champignons

La classification des champignons repose essentiellement sur le type de thalle formé et sur le mode de reproduction (type de spores). Elle comprend cinq classes :

9. Classe des Chytridiomycètes

Les Chytridiomycètes sont les seuls membres des vrais champignons qui produisent des cellules mobiles à un certain stade dans leurs cycles biologiques. A l'exception de quelques espèces avec des cellules polyflagellées, les cellules mobiles de la plupart des autres espèces possèdent un seul flagelle, dirigé postérieurement. Une autre caractéristique des Chytridiomycètes, partagée avec les *Zygomycota*, est d'avoir un thalle coenocytique quand il est filamenteux. Le thalle peut aussi être unicellulaire.

Les parois cellulaires sont connues contenir la chitine et les glucanes, bien que la cellulose ait été démontrée exister chez au moins une espèce. Bien que la plupart des Chytridiomycètes soit saprobe, plusieurs pathogènes de plantes, d'animaux et de champignons sont connus. Certaines espèces phytopathogènes sont d'importants vecteurs de nombreux virus de plantes d'importance économique. Elles peuvent être des parasites endobiotiques vivant entièrement à l'intérieur des cellules de leurs hôtes ou des parasites épibiotiques produisant leurs structures reproductives à la surface de leurs hôtes.

Certains Chytridiomycètes produisent des rhizoïdes qui sont des filaments courts qui contiennent un cytoplasme mais non des noyaux et sont éventuellement séparés du reste du thalle par des cloisons. Ils servent à ancrer le thalle à son substrat et le nourrit en absorbant la nourriture. Chez d'autres espèces, le thalle est caractérisé par un mycélium plus ramifié et est alors appelé rhizomycélium. Bien que les hyphes des Chytridiomycètes soient typiquement coenocytiques, chez certaines espèces, une cloison se forme régulièrement à la base de chaque structure reproductrice et des cloisons dispersées peuvent se former dans les parties les plus âgées des hyphes. Les mycéliums de la plupart des formes complexes peuvent produire des pseudocloisons qui sont chimiquement différentes des parois hyphales.

La reproduction asexuée des Chytridiomycètes a lieu par l'intermédiaire des zoospores qui se forment dans les sporanges. Ces zoospores postérieurement uniflagellées peuvent émerger à travers une ou plusieurs papilles quand le sporange se décharge.

La reproduction sexuée des Chytridiomycètes est accomplie par une variété de méthodes. Certaines espèces sont holocarpiques, tandis que d'autres sont eucarpiques. Dans cette reproduction, la copulation peut être planogamétique où la conjugaison a lieu entre des planogamètes isogames (gamètes morphologiquement similaires) ou des planogamètes anisogames (gamètes morphologiquement différents). La copulation peut aussi avoir lieu quand un gamète mâle mobile (anthérozoïde) libéré à partir d'un gamétange mâle, féconde un gamète femelle non mobile (oeuf). Chez des formes plus évoluées, la copulation est gamétangique et est accomplie par le transfert d'un protoplaste entier d'un gamétange dans un autre. La reproduction des Chytridiomycètes peut aussi prendre place par somatogamie qui est la fusion de structures végétatives.

La classe des Chytridiomycètes renferme cinq ordres parmi lesquels trois contiennent des phytopathogènes. Ces derniers ordres sont :

Blastocladales,

Chytridiales et

Spizellomycétales.

Le phylum des *Zygomycota* contient environ 1100 espèces décrites. Elles sont aquatiques ou terrestres, saprobes ou parasites principalement des arthropodes. Ce phylum renferme deux classes qui sont les Zygomycètes et les Trichomycètes. Seule la classe des Zygomycètes contient quelques espèces phytopathogènes.

9.1. Classe des Zygomycètes

La classe des Zygomycètes contient environ 870 espèces décrites. Les principales caractéristiques de cette classe sont l'absence de cellules mobiles et la présence de mycélium coenocytique comme thalle. Les parois hyphales sont composées de chitine, chitosane et acide polyglucuronique. Chez certaines espèces, le mycélium peut posséder des cloisons plus ou moins régulièrement espacées. Quelques autres espèces sont dimorphiques et ainsi capables de croître comme des mycéliums ou des levures. Certaines espèces croissent par des hyphes aériens appelés stolons qui développent des rhizoïdes en contact avec le substrat. Plusieurs Zygomycètes sont des espèces mycorrhiziennes.

La reproduction asexuée des Zygomycètes se réalise par l'intermédiaire des sporangiospores ou des conidies. En outre, quelques espèces produisent des chlamydospores, des oïdies ou des arthrospores. Les sporangiospores (des dizaines jusqu'à des dizaines de milliers) se forment dans les sporanges avec des columelles portées par un sporangiophore. Certaines espèces produisent de petits sporanges appelés sporangioles, avec ou sans columelles. Ces sporangioles peuvent contenir une à 30 sporangiospores. Dans le cas d'une seule sporangiospore par sporangiole, il est nécessaire de la différencier d'une conidie qui ne se forme dans aucune structure en forme de sac. Les sporangioles de certaines espèces sont appelés mérosporangies quand ils sont cylindriques, allongés et contiennent une série des sporangiospores.

La reproduction sexuée des Zygomycètes prend place par la fusion de deux gamétanges. Ces derniers évoluent en zygosporange qui produit à la fin une spore de conservation à paroi épaisse appelée zygospore. Beaucoup d'espèces sont hétérothalliques tandis que certaines autres sont homothalliques.

La classe des Zygomycètes contient 10 ordres, parmi lesquels, seul un ordre renferme quelques phytopathogènes. Cet ordre est celui des Mucorales.

9.2. *Classe des Ascomycètes*

La classe des Ascomycètes est le plus grand groupe de champignons avec plus de 32700 espèces décrites qui sont majoritairement terrestres plutôt qu'aquatiques, saprobes, symbiotes ou parasites spécialement des plantes. Les caractéristiques les plus communes sont la production d'ascospores et la présence de parois hyphales lamellaires avec une couche externe mince dense aux électrons et une couche interne relativement épaisse, transparente aux électrons. Ces caractéristiques permettent aux mycologistes de reconnaître la plupart des Deutéromycètes comme des *Ascomycotamême* en absence des asques.

Le thalle des *Ascomycota* peut être unicellulaire, mycélien ou dimorphique. Les parois cellulaires contiennent principalement la chitine, bien que la présence de cellulose ait été rapportée chez certaines espèces. Chez les levures fermentatives (Saccharomycètes), les mannanes et les β -1,3-glucanes sont les principaux polysaccharides des parois et seulement des teneurs limitées de chitine sont présentes. Les hyphes des *Ascomycota* sont divisés en compartiments par des cloisons contenant d'habitude, au niveau de leur centre, un petit pore circulaire qui permet une continuité cytoplasmique entre les cellules des hyphes. Les pores peuvent être bouchés avec les corps de Woronin pour différentes raisons, telles que pour séparer des hyphes âgées ou endommagées du reste du mycélium. Les *Ascomycota* peuvent produire des structures mycéliennes spécialisées telles que les appressories, les haustories et les hyphopodes.

La reproduction asexuée a lieu par l'intermédiaire de diverses conidies produites directement sur le thalle ou à partir de cellules conidiogènes portées par des conidiophores qui sont libres sur le thalle ou groupés dans/sur des structures conidifères particulières. Cette reproduction asexuée des anamorphes des *Ascomycota* peut être développée plus loin dans le chapitre réservé aux Deutéromycètes.

La reproduction sexuée des *Ascomycota* s'effectue de différentes façons :

- Isogamétangie : deux gamétanges morphologiquement similaires fusionnent et la cellule de fusion se développe en asque. Dans la plupart des cas, la caryogamie prend place rapidement après la plasmogamie de façon à ce que la phase dicaryotique soit courte,

Hétérogamétangie : deux gamétanges uninucléés ou multinucléés morphologiquement différents sont produits. Le mâle, l'anthéridie, vide son contenu dans la femelle, l'ascogone, par l'intermédiaire d'un hyphe spécialisé portée par l'ascogone, le trichogyne. Les asques se développent à partir d'excroissances de l'ascogone. La phase dicaryotique peut persister un moment avant que la caryogamie ne se réalise,

- Spermatisation : Une seule cellule mâle détachée s'attache à une structure femelle réceptive (trichogyne ou hyphe somatique) et vide son noyau dans la cellule réceptive. Ensuite, le noyau mâle migre jusqu'à l'ascogone à travers les pores des cloisons. Le gamète mâle fonctionnel peut être une spermatie, une microconidie ou une conidie. Les spermaties sont de minuscules cellules sphériques ou allongées, unicellées et de sexe mâle, incapables de germer par un tube germinatif. Elles peuvent se former sur le mycélium ou dans des structures spécialisées appelées spermogonies.

Les microconidies (conidies minuscules) et les conidies se comportent comme des spermaties, mais peuvent aussi germer par un tube germinatif, - Somatogamie : Deux hyphes somatiques non spécialisées de deux mycéliums compatibles fusionnent et leurs noyaux migrent jusqu'à l'ascogone à travers les pores des cloisons.

9.3. Classe des basidiomycètes

Le Classe des basidiomycètes est un grand groupe diversifié de champignons contenant près de 30000 espèces décrites. Ils sont caractérisés par la production de basides portant des basidiospores après plasmogamie, caryogamie et méiose. Beaucoup d'espèces macroscopiques sont communément observées dans les prairies et les forêts. Le thalle des Basidiomycota consiste généralement en des hyphes cloisonnés bien développées et moins fréquemment en levures unicellulaires. Le mycélium formé d'hyphes est d'habitude de

couleur blanche, jaune ou orangée. Chez certaines espèces, les hyphes mycéliens peuvent se développer en rhizomorphes ou en cordons mycéliens.

Le mycélium de la plupart des espèces hétérothalliques passe par trois stades de développement distincts, primaire, secondaire et tertiaire. Le mycélium primaire est homocaryotique et d'habitude se développe après la germination des basidiospores. Ce mycélium cloisonné est souvent composé de cellules uniclées. Ensuite, le mycélium primaire donne naissance au mycélium secondaire après la plasmogamie entre des spermaties et/ou des hyphes. En conséquence, ce mycélium secondaire et les spores qu'il produit, sont dicaryotiques avec des cellules binuclées. Durant ce stade l'une des caractéristiques spécifiques aux Basidiomycota est la production d'anses d'anastomose qui se forment durant la division conjuguée des noyaux à l'extrémité d'un hyphe en croissance. Une autre caractéristique spécifique et la formation chez beaucoup d'espèces de Basidiomycota de cloison dolipore qui peut être couverte de parenthosomes (Figure 2-9). Le mycélium tertiaire se développe à partir du mycélium secondaire et consiste en un mycélium organisé et spécialisé qui renferme les basidiocarpes et/ou les basides qui libèrent les basidiospores. Avant que la caryogamie n'ait lieu dans les basides, le mycélium tertiaire est aussi dicaryotique.

La reproduction asexuée des Basidiomycota entraîne, pour la plupart des espèces, la production de diverses conidies. Ces types de spores peuvent garder leur nom général (conidies) comme pour les agents des charbons ou peuvent être désigné par des noms spécifiques (urédospores) comme pour les agents des rouilles. Contrairement, aux Ascomycota, les écartés des Deutéromycètes. Seuls quelques anamorphes des Basidiomycota sont affectés aux Deutéromycètes. Ces espèces sont connues appartenir à la classe des Basidiomycètes (sensu stricto). Elles sont en général incapables de produire des conidies de façon à ce qu'ils se développent durant le stade anamorphique seulement par l'intermédiaire de la multiplication végétative de leurs mycéliums. Quelques exemples seront donnés dans le chapitre réservé aux Deutéromycètes (parmi les Agonomycètes).

La reproduction sexuée chez les Basidiomycota culmine par la production des basides portant des basidiospores. Elle commence par la fusion et plasmogamie des spermaties et des hyphes réceptifs ou entre des hyphes de mycéliums primaires compatibles. Les stades suivants sont les mycéliums secondaires et tertiaires qui sont dicaryotiques. A partir du mycélium tertiaire, les basidiocarpes et/ou les basides se différencient.

Ensuite, la caryogamie et la méiose à lieu dans les basides qui produisent les basidiospores extérieurement. La germination des basidiospores donne d'habitude naissance au mycélium primaire. Dans les deux classes des Urédinomycètes et des Ustilaginomycètes, la différenciation des basides est précédée par un stade de spore de conservation appelé téliosspore. Les basidiospores sont typiquement haploïdes, uninucléées et au nombre de quatre. Leur germination permet le développement du mycélium primaire. Ce type de germination est fréquent et est appelé germination directe. Dans quelques groupes, cependant, les basidiospores peuvent germer pour former ce qui est appelé des spores secondaires ou bourgeonner pour former des conidies ou des microconidies.

Ensuite, ces spores secondaires et conidies ou microconidies germent pour développer le mycélium primaire. Ce type de germination est désigné par germination indirecte.

Les basides sont des structures qui portent à leur surface un nombre défini de basidiospores qui se forment après caryogamie et méiose (Figures 2-9 et 2-10). La baside peut être de structure simple en forme de massue dont l'origine est une cellule terminale d'un hyphe binucléé. Après caryogamie et méiose, cette baside donne naissance à quatre noyaux haploïdes tandis que quatre petites excroissances appelées stérigmates poussent vers l'extérieur au sommet de la baside et élargissent leurs extrémités pour former les débuts des basidiospores. Pendant ce temps, une vacuole se forme à la base de la baside, s'accroît en taille et pousse les contenus de la baside dans les basidiospores en formation, de façon à ce que chaque basidiospore reçoit finalement une portion de cytoplasme et un seul noyau.

9.4. *Deutéromycètes ou champignons anamorphiques*

Les Deutéromycètes ou Champignons Anamorphiques forment un groupe hétérogène d'environ 20000 espèces décrites qui sont capables de se reproduire asexuellement par l'intermédiaire de la production de spores mitotiques qui ne nécessite pas de méiose (anamorphes). Parmi ces espèces, nombreuses sont corrélées avec des stades fongiques qui se reproduisent sexuellement par l'intermédiaire de la production de spores méiotiques (téléomorphes). Ces téléomorphes sont généralement des espèces d'*Ascomycota* et rarement des espèces de *Basidiomycota*. Pour plusieurs autres anamorphes, cependant, les téléomorphes restent inconnues. Certains de ces anamorphes semblent avoir perdu la sexualité. Ces champignons pourraient avoir suivi des voies évolutives indépendantes de leurs holomorphes. Pour cette raison, les anamorphes ont été désignés par Champignons Imparfais (sans sexualité), champignons mitosporés (spores mitotiques), Deutéromycètes (membres de classe secondaire), etc...

Bien que beaucoup de connexions de stades anamorphe/téléomorphe aient été établies durant le dernier siècle, nombreux anamorphes restent non reliés. L'établissement des connexions a été basé sur l'observation du cycle biologique, de la morphologie et de la structure telle que la paroi cellulaire et les cloisons. Ainsi, il n'était pas si facile d'établir une relation anamorphe téléomorphe quand les critères utilisés sont absents ou insuffisamment clairs.

Actuellement, il devient possible, moyennant le séquençage de l'ADN, de placer les anamorphes restant avec les groupes de téléomorphes à partir desquels ils ont une fois dérivé.

Le Thalle des Deutéromycètes est typiquement bien développé, cloisonné, avec des hyphes ramifiés qui ressemblent à ceux de leurs proches parents sexués (*Ascomycota* ou *Basidiomycota*). En plus du thalle mycélien, certaines espèces fongiques anamorphiques sont unicellulaires (levures).

La reproduction asexuée des Deutéromycètes est un phénomène fréquent qui permet aux anamorphes de se reproduire activement et de se disséminer rapidement aussi longtemps

que les conditions de l'environnement restent favorables. La reproduction asexuée conduit à la production de spores qui sont en majorité désignées par conidies. Ainsi, les conidies sont produites directement à partir du thalle préexistant ou par l'intermédiaire de cellules conidiogènes portées ou non par des hyphes spécialisés appelées conidiophores. En dehors des Agonomycètes qui colonisent leur environnement par simple multiplication végétative, la plupart des Deutéromycètes produit des conidies (Hyphomycètes et Coelomycètes).

Cellules conidiogènes : Les cellules conidiogènes sont les cellules hyphales dans/à partir desquelles les conidies se forment directement. Ces cellules conidiogènes peuvent être morphologiquement similaires aux cellules des hyphes somatiques ou peuvent être assez différentes en apparence.

Conidiophores : Les conidiophores sont des hyphes spécialisées, simples ou ramifiées qui portent une ou plusieurs cellules conidiogènes. Ces dernières peuvent être intégrées dans les conidiophores ou différenciées à partir d'eux.

Conidies : Les conidies sont des spores produites asexuellement. Elles ont diverses tailles, formes, couleurs et nombres de cellules. Elles peuvent être produites directement sur le thalle ou dans/sur des conidiomes. La plupart des conidies germe par un tube germinatif pour produire un mycélium et ainsi, éventuellement, des conidies de nouveau. Ce processus est désigné par conidiation macrocyclique contrairement à la conidiation microcyclique où les conidies germent et produisent directement des conidies. Les conidies peuvent prendre origine directement à partir du thalle préexistant (ontogénie thalique). La conidie est délimitée par une cloison avant que son gonflement n'ait lieu. Ce type de conidies est appelée thalloconidies ou conidies thaliques (Figure 2-12). Plus fréquemment, les conidies produites *de novo* prennent origine à partir de cellules conidiogènes (ontogénie blastique). La conidie s'allonge et gonfle avant d'être séparée par une cloison. Elle prend d'habitude origine au niveau d'un point étroit sur la cellule conidiogène. Ces conidies sont appelées blastoconidies ou conidies blastiques.

9.4.1. Pathologie de la fusariose vasculaire

Lorsque la forme spécialisée *albedinis* du *Fusarium oxysporum* infecte son hôte particulier qui est le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.), son action parasitaire se montre catastrophique. La maladie est une trachéomycose. Elle entraîne une perte d'eau et de métabolites nécessaires à la survie des cellules végétales, détruisant ainsi les constituants essentiels des cellules. La Fusariose vasculaire provoque dessèchement et flétrissement progressif suivi d'un jaunissement des feuilles. Enfin la plante fane complètement et meurt (Agrios, 2005). La plante à son tour tente de limiter l'extension du parasite, en édifiant autour de la zone infectée des barrages qui arrêteront la progression du champignon, du moins partiellement. Les vaisseaux sont comblés par des thylls ou des dépôts gommeux : bouchons produits par des cellules du parenchyme (Tantaouiet *al*, 1996). Les cellules se nécrosent autour des hyphes, pour isoler le parasite au sein des tissus morts (Dixon, 1981). Selon certaines théories, la Fusariose est due à la sécrétion de toxines telles que Lycomarasmine et l'acide fusarique (Salama et Mishricky, 1987).

Tableau 2: Clé détermination simplifiée des principaux genres de Deutéromycètes importants en phytopathologie (Lepoivre, 2003)

Forme et/ou nombre de cellules par conidie	Moniliales (conidiophores libre)		Mélanconiales (acervule)		Shpaeropsidales (pycnide)	
	<i>Conidies hyalines</i>	<i>Conidies foncés</i>	<i>Conidies hyalines</i>	<i>Conidies foncés</i>	<i>Conidies hyalines</i>	<i>Conidies foncés</i>
Unicellulaire	<i>Aspergillus</i> <i>Botrytis</i> <i>Fusarium</i> <i>Monilia</i> <i>Oidium</i> <i>Penicillium</i> <i>Trichoderma</i> <i>Verticillium</i>	<i>Chalara</i> <i>Spilocaea</i> <i>Thielaviopsis</i>	<i>Colletotrichum</i> <i>Gloeosporium</i> <i>Sphaceloma</i>	<i>Melanconium</i>	<i>Cytospora</i> <i>Dothichiza</i> <i>Fusicoccum</i> <i>Phoma</i> <i>Phyllosticta</i> <i>Phomopsis</i>	<i>Coniothyrium</i> <i>Sphaeropsis</i>
Bicellulaire	<i>Rhynchosporium</i> <i>Cyclindrocladium</i>	<i>Cladosporium</i> <i>Fusicladium</i>	<i>Marssonina</i>		<i>Ascochyta</i>	<i>Diplodia</i>
Pluricellulaire	<i>Pyricularia</i> <i>Ramularia</i> <i>Fusarium</i>	<i>Drechlera</i> <i>Curvalaria</i>		<i>Coryneum</i>		
Pluricellulaire filiforme	<i>Cercospora</i>	<i>Cercospora</i>	<i>Cylindrosporium</i>		<i>Septoria</i>	
Pluricellulaire muriforme		<i>Alternaria</i> <i>Stemphyllium</i>				

Infection par des souches de *Xanthomonas* responsables de la graisse commune du haricot

Les bactéries du genre *Xanthomonas* portent des effecteurs de type III appelés effecteurs transcription activator-like (TAL). Après avoir été injectés dans les cellules de l'hôte, les effecteurs TAL sont capables de migrer dans le noyau où ils agissent en général comme des facteurs de transcription de gènes de sensibilité afin de promouvoir l'infection.



Les souches de *Xanthomonas* responsables de la graisse commune sur haricot se répartissent en quatre lignées phylogénétiquement distinctes appartenant à *Xanthomonas phaseoli* pv. *phaseoli* (Xpp) ou *X. citri* pv. *fuscans* (Xcf). L'objectif de ce travail a été d'étudier la diversité et l'évolution des effecteurs TAL en lien avec l'adaptation à l'hôte, chez les souches de *Xanthomonas* responsables de la graisse commune du haricot. Nous avons séquencé 17 souches représentatives de la diversité des quatre lignées de Xpp et Xcf par séquençage PacBio. L'analyse de ces génomes a révélé l'existence de quatre gènes tal, dont deux sont localisés sur le chromosome et spécifiques de certaines souches de Xcf, tandis que les deux autres sont plasmidiques et partagés entre souches phylogénétiquement éloignées. Nous avons mis en évidence que ces deux tal plasmidiques avaient été récemment transférés horizontalement entre Xcf et Xpp. Nos résultats suggèrent que les effecteurs.

10. Moyens de lutte

Les plantes, comme tous les organismes vivants, subissent l'action de divers parasites. Ces organismes nuisibles s'attaquent directement aux tissus des plantes, où ils entrent avec eux en concurrence sur le plan des ressources comme l'air, l'eau et les éléments nutritifs du sol (Metcalf et Luckman, 1994). La protection des plantes peut être divisée selon plusieurs approches. Une protection largement majoritaire des denrées agricoles est produite à l'intérieur de systèmes où la protection des plantes repose sur la lutte.

10.1. Lutte génétique

La lutte génétique exploite la diversité phylogénétique afin de cerner la maladie, et peupler les zones dévastées. Cette technique consiste à introduire des gènes de résistance au niveau des plantes appelées : plante transgénique. Ces gènes produisent des protéines susceptibles d'éliminer le parasite.

10.2. Lutte culturale

Il est difficile de prévoir l'effet de toute intervention sur un milieu aussi complexe que le sol, et de formuler des règles générales. Généralement, la lutte culturale se résume en deux formules :

1- La répétition de cultures d'un hôte sensible à un parasite tend à faire augmenter le nombre de germes de celui-ci dans le sol.

2- Réciproquement, la culture de plantes non sensibles et l'incorporation de matière organique non colonisable par le parasite permettront la prolifération d'organismes susceptibles de concurrencer le parasite (Messieanet al, 1991).

10.3. Lutte biologique

Dans un contexte d'agriculture durable, la lutte biologique peut offrir de nombreuses méthodes de lutte alternatives aux pesticides de synthèse.

La variation entre les microorganismes est une caractéristique inhérente et fondamentale des organismes biologiques et constitue une limite importante de la lutte biologique.

Entre autres, cela est lié au comportement de quête de nourriture des parasites qui est fonction de leurs diversités génotypique et phénotypique. Pour la lutte biologique, les bactéries suivantes sont les plus utilisées : *Pseudomonas fluorescens* ou *Pseudomonas putida*, *Erwinia herbicola*, *Bacillus subtilis* et *Enterobacter cloacae*. D'excellents résultats sont obtenus avec *Enterobacter cloacae* et *Erwinia herbicola* aussi bons qu'un traitement avec la metalaxyl à 25 °C, inférieurs à 15 °C. Les performances des divers isolats sont en relation

avec la suppression de la colonisation de la graine par *Pythium* durant les premières 24 heures de sa germination.

Des souches de *Pseudomonas fluorescens* isolées de sol sont actives envers le piétin échaudage (*Gaeumannomycesgraminis* var. *tritici*). Par enrobage des graines, on obtient une augmentation de rendement due à la diminution des dommages par piétin échaudage.

10.4. Lutte chimique

Avec l'apparition des pesticides de synthèse, il y environ 50 ans, certains ont imaginé que les ennemies des cultures seraient battues en brèche et éliminés. De toute évidence, cela ne s'est pas produit. Toutefois, l'augmentation de la quantité et de la qualité des denrées agricoles produites n'est certainement pas étrangère à l'utilisation des pesticides, et les agricultures ayant accès aux pesticides de synthèse sont rarement victimes d'infections dévastatrices (Bailly, et al., 1990).

10.5. LA LUTTE GÉNÉTIQUE

En matière de protection des plantes, la lutte génétique consiste à substituer à des plantes sensibles à une agression, d'autres variétés résistantes.

Sa mise en œuvre dépend uniquement de la recherche, qui l'initie et la met au point, et d'un service de vulgarisation qui la diffuse ainsi que le matériel végétal proposé. Elle résulte de la collaboration du phytopathologiste (*sensu lato*) et du généticien pour les maladies les plus graves.

Un certain nombre de maladies des plantes maraîchères sont actuellement contrôlables par la lutte génétique : mildiou du concombre par la variété Points et/ou la variété thaïlandaise, stemphyliose de la tomate par la variété Louisiana, fusariose de la tomate (race 1) par la variété Roma, dépérissement à *Meloidogyne* par les variétés Piersol, Monita, Caraïbe (gène Mi).

10.5.1.1. *Alternaria* :

Alternaria est un champignon phytopathogène nécrotrophe qui provoque la maladie des points noirs sur un large éventail d'hôtes, y compris un certain nombre de cultures économiquement importantes telles que le chou, le chou chinois, le chou-fleur, les oléagineux, le brocoli et le canola.

Alternaria circinans : (Berk. et Eurt.) Ball e Synonyme : *Alternaria brassicola* (Schw.) Wiltshire

Maladies et hôtes : alternariose (*Brassicaoleracea*).

Agression : feuilles, taches noires nécrosées, humides puis sèches.

Dissémination : conidies à propagation aérienne, disséminées par la pluie.

Conservation : thalle et conidies sur débris de culture.

Caractères d'identification : Les fructifications sont amphigènes : conidiophores bruns, irréguliers, porteurs de dictyoconidies (1-8 cloisons transversales et 0-1 longitudinale), brunes à bec court, en chaînes, mesurant 50-73 x 11 -21 um.

Alternaria dauci : (Kühn) Graves et Skolko Synonyme : *Alternaria porri* (Ell.) Neerg. f. sp. *dauci* (Kühn) Neerg.

Maladies et hôtes : alternariose de la carotte (*Oaucuscarota*).

Agression : feuilles et pétioles, nécrose sèche.

Dissémination : par conidies à propagation aérienne et par semences contaminées.

Conservation : thalle et conidies sur débris de culture. Les dictyoconidies brunes, claviformes, avec bec très long (100 à 200 um). Souvent dédoublé par dihotomie, mesurent 54-90 x 18- 23um.

Position systématique
Classe : Dothideomycetes
Ordre : Pleosporales
Famille: Pleosporaceae
Genre: *Alternaria*

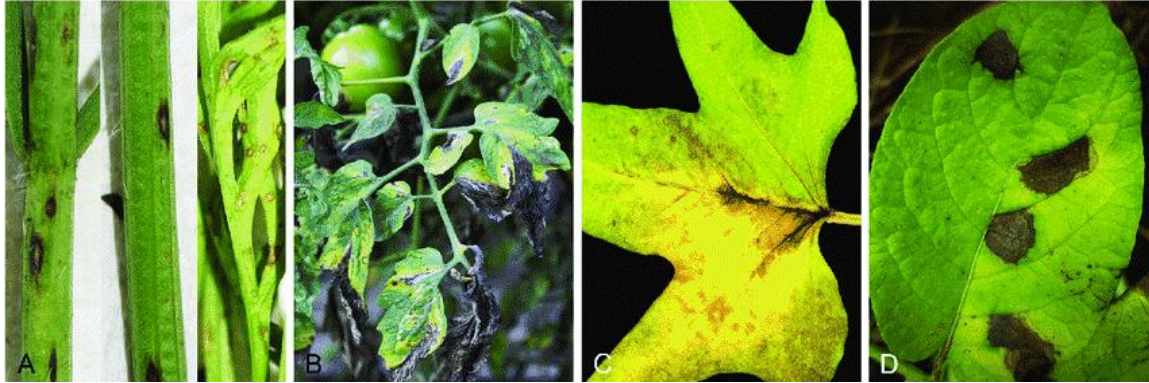


Figure 5: Quelques symptômes provoqués par *Alternaria*

A. *Alternaria dauci* sur *Daucus carota*. B. *Alternaria linariae* sur *Solanum lycopersicum*.
C. *Alternaria neoipomoeae* sur *Ipomoea batatas*. D. *Alternaria solani* sur *Solanum tuberosum*.

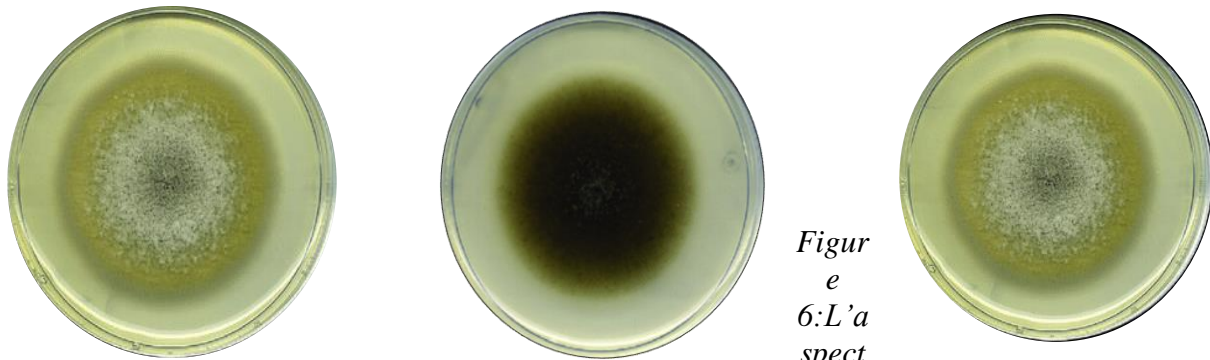


Figure
6: L'aspect
morphologique

Alternaria fimeti sur différents milieux de culture

A. Colonies sur milieu PDA. B. Colonies sur milieu PCA. C. Colonies sur milieu OA.

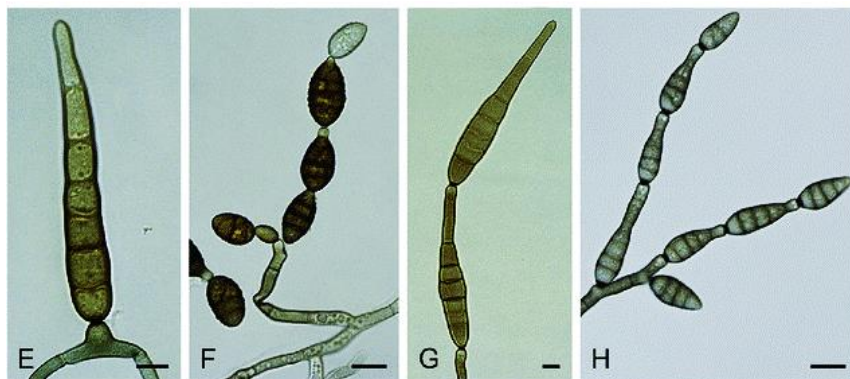


Figure 7: Quelques formes de conidiophores de *Alternaria*

E. *Alternaria caricis*. F. *Alternaria chartarum*. G. *Alternaria cinerariae*. H. *Alternaria conjuncta*. bars: 10 μ m.

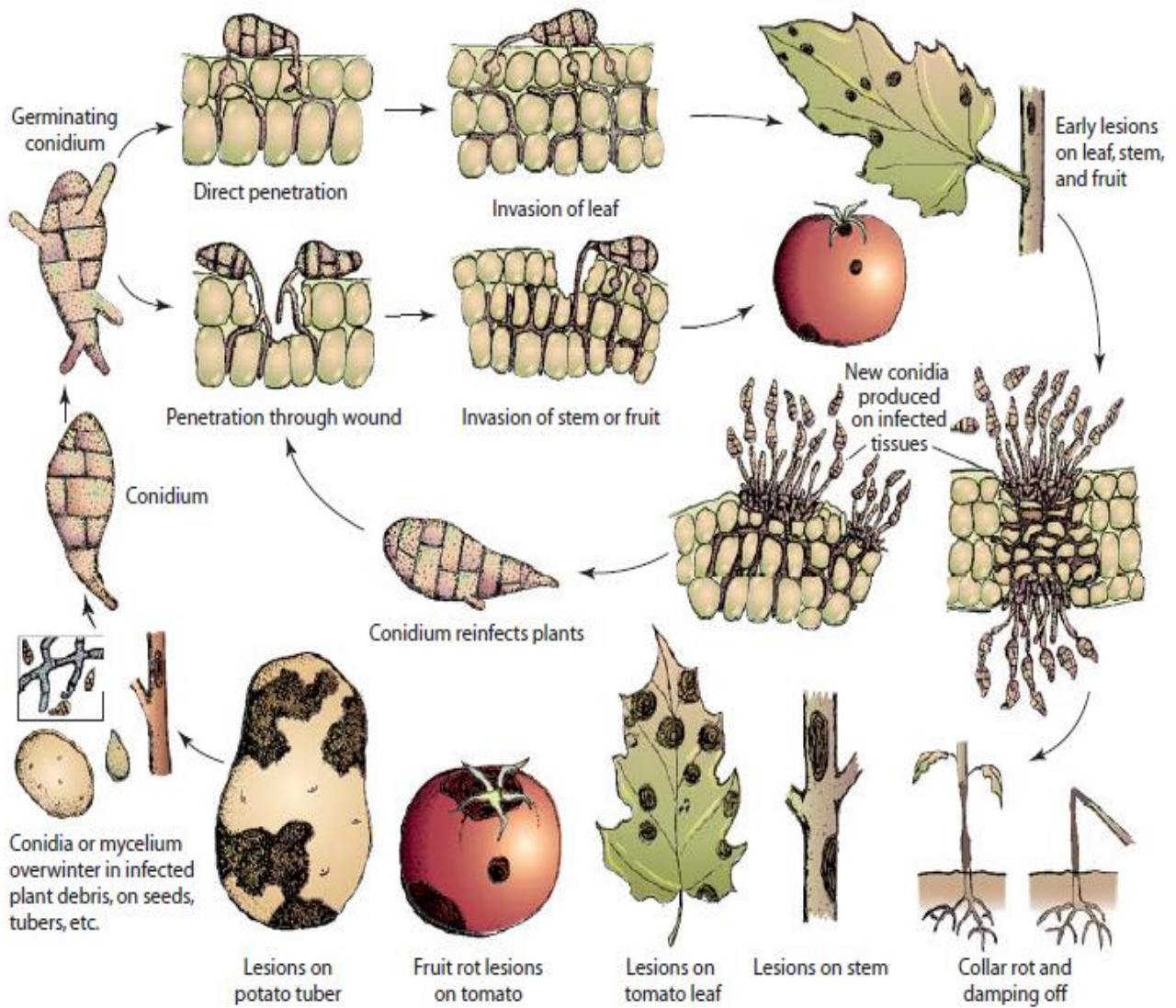


Figure 8: Cycle de vie *Alternaria*

10.5.1.2. *Ascochyta*

La brûlure *Ascochyti*que (anthracnose) est la maladie fongique la plus nuisible chez les légumineuses (pois chiche, fève, petit pois), elle influence le rendement de ces importantes légumineuses et cause de redoutables dégâts. Au Pakistan par exemple, durant trois années consécutives 50% de la production ont été perdues

Maladies et hôtes : Le haricot, les pois (*Pisum arvense* et *Pisum sativum*), les vesces (*Vicia sativa cracca*, *villosa americana* etc...) *Ervum lens*, *Lathyrus odoratus*, *Cicer arietinum* etc

Agression : feuilles, rameaux et fruits ; nécrose brune.

Dissémination : conidies à propagation aérienne.

Conservation : pycnides sur débris de culture.

Caractères d'identification : Le mycélium hyalin, très cloisonné, variqueux élabore des pycnides brunes, arrondies à ovales, 100-170 µm, dotées d'un ostiole de 25 µm, qui contiennent des conidies hyalines uni- et bicellulaires en mélange, mesurant 8-10 x 4-5 µm.

Biologie : parasite facultatif, forme parfaite inconnue.

Contrôle : dans les essais in vitro, destinés à comparer les fongicides du point de vue de leur activité fongistatique, le Bénomyl, le Captafol et le Dichlofluanide se sont montrés les plus efficaces, la Triforine et certains dithiocarbamates modérément efficaces et le Manèbe peu efficace.

Position systématique *Ascochyta*

Subdivision : Deuteromycotiana

Classe : Adélomycètes

Ordre : Sphaeropsidales

Famille : sphaeropsidacées

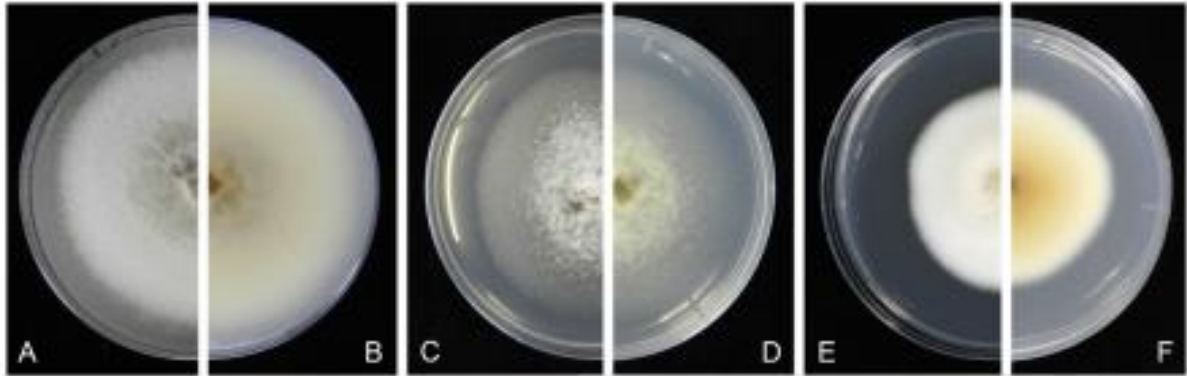
Genre : *Ascochyta*



Figure



9: Quelques symptômes provoqués par



Ascochyta (nécroses sur feuilles, tige et gousse)

Figure 10: *Ascochyta pisi*

Colony (front and reverse) cultivated on different media A–B. Colony on OA. C–D. Colony on MEA. E–F. Colony on PDA.

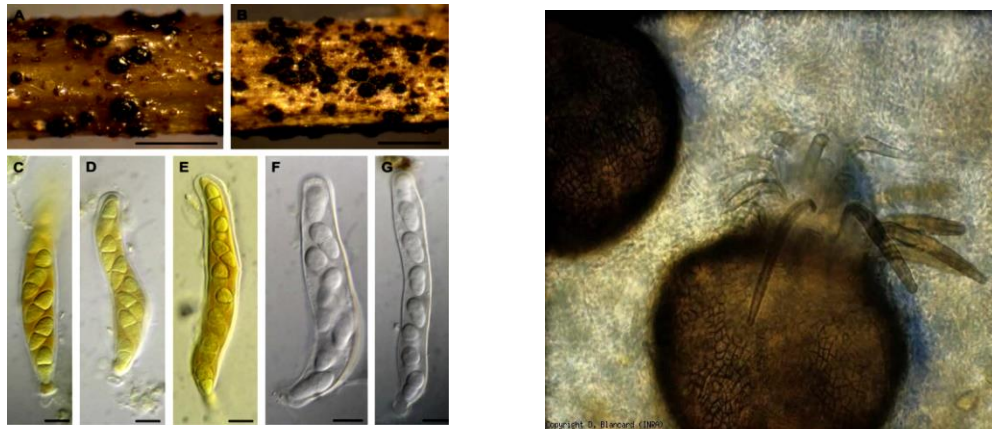


Figure 11: Morphologie des organes de reproduction sexuée et asexuée chez *Ascochyta Didymella*. Des tâches noires sur la tige sont des pseudothèces, les plus petites structures sont des pycnides, (A) avant et (B) après séchage. Barres [(A – B) 1 mm; (C – G) 10 μ m (Chilvers, et al., 2009)

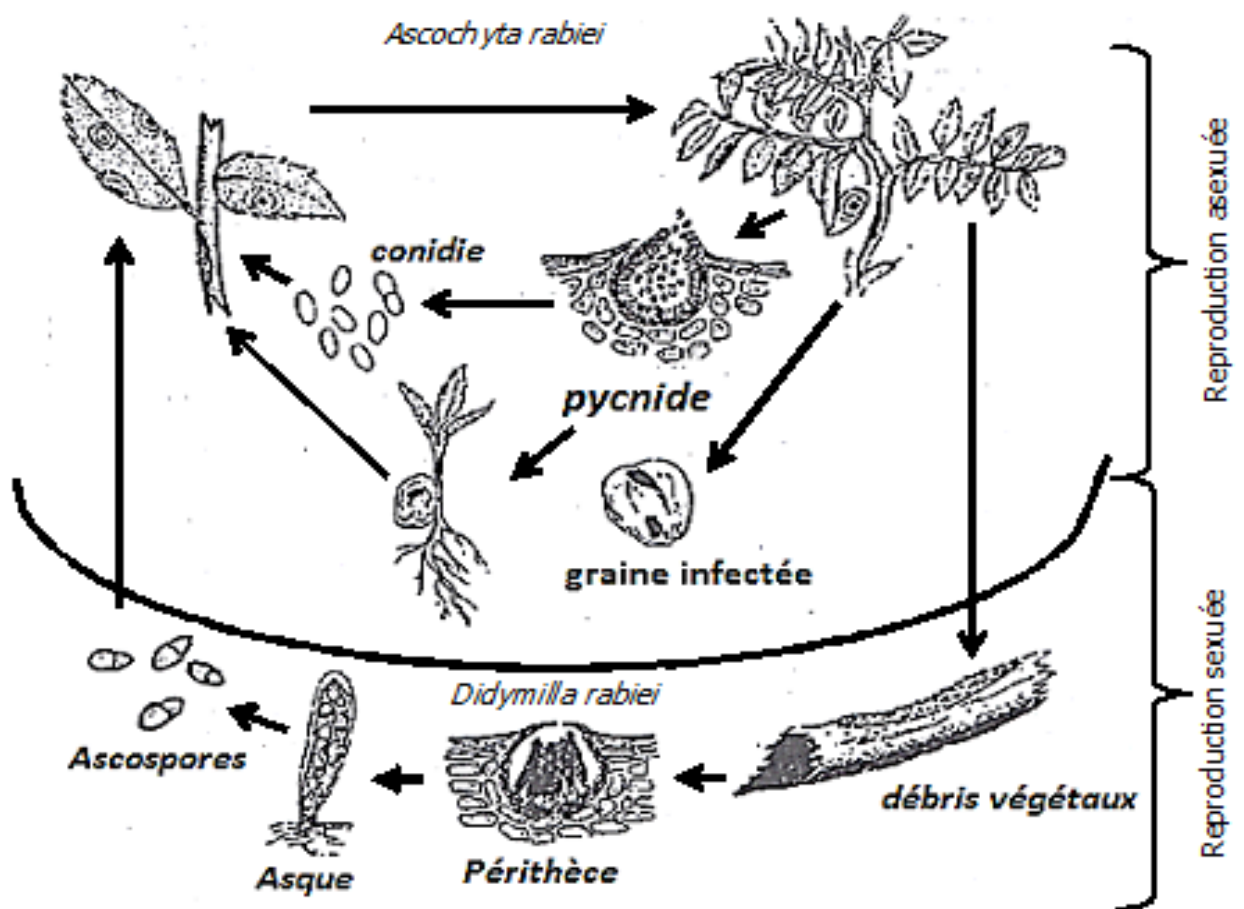


Figure 12: Cycle de vie d'*Ascochyta rabiei* (Wise et al, 2009)

10.5.1.3. *Phytophthora infestans* (Mont.) De Bary

Maladies et hôtes : mildiou de la tomate (*Lycopersicon esculentum*).

Agression : feuilles, rameaux et fruits.

Dissémination : Conidies " (= conidiocystes) à propagation aérienne.

Conservation : thalle sur déb ris végétaux, thalle saprophyte dans le sol.

Caractères d'identifications :

Hyalin et siphon é, le mycélium est intercellulaire, d'un diamètre de 34,5 µm ; les conidiophores émergent par les stomates par groupe de 2 à 5, bien différenciés, à croissance indéterminée, ramifiés avec des renflements espacés, et amincis à leur extrémité ; les conidiocystes hyalins, ovoïdes et papilles, mesurent 21-36 x 16- 23 urn ,

Biologie : *Phytophthora* (hétérothallique du groupe IV de Waterhouse) est également un parasite facultatif.

Facteurs extrinsèques :

Les températures cardinales sont 4-8 x 28-30° C ; la fructification ne se produit que pour des humidités relatives supérieures à 90 % maintenues pendant 6 à 8 heures.

Les « conidies " germent par planoconidies à température < 18 oc, et par tube germinatif à température plus élevée.

Contrôle : la souche d'Abengourou n'a pu être mise en culture : aucun essai fongicide n'a été réalisé.

Position Systématique

Division : *Stramenopiles*

Classe : *Oomycetes*

Ordre : *Peronosporales*

Famille : *Pythiaceae*

Genre : *Phytophthora*



Figure 13: Symptômes de la maladie sur: A) Fruits de la tomate; B) feuilles de Pomme de terre; C) de pomme de terre.



Figure 14: Des sporangiophores produisant des sporanges

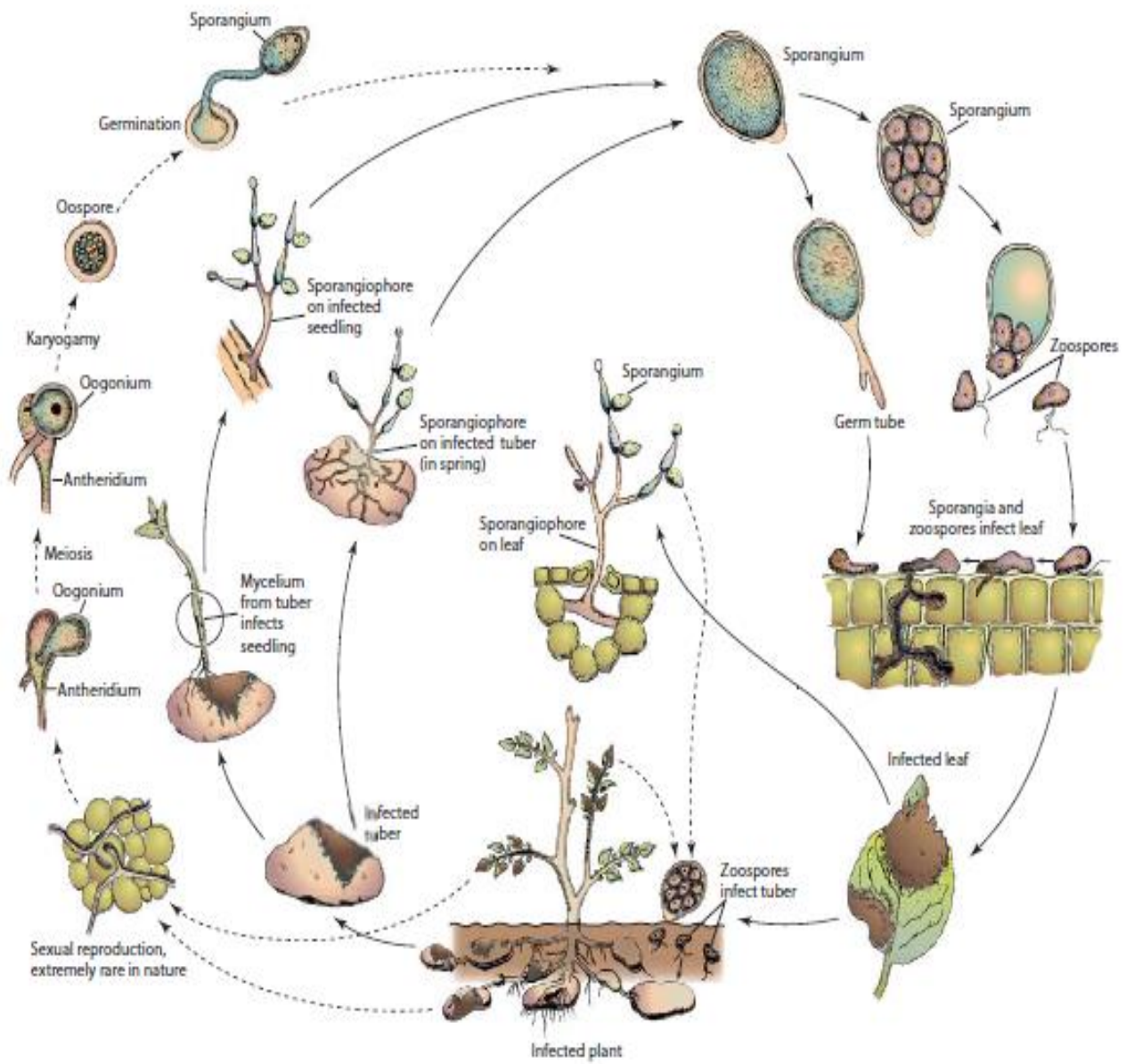


Figure 15: Cycle de développement de *Phytophthora infestans*

10.5.1.4. *Pythium aphanidermatum* (Eds.) Fitzp.

Maladies et hôtes : jambe noire de l'aubergine Ndrowa (*Solanum tethiolicum* Trü, très polychète : aubergine, concombre, gombo, haricot, laitue, melon, poivron, pomme de terre, tomate.

Agression : fonte des semis, pourriture des racines, pourriture du collet, pourriture de fruits.

Dissémination : planoconidies nageuses, telluriques, disséminées par l'eau d'irrigation.

Conservation : zygotes kystiques telluriques, thalle et zygotes sur débris de plantes malades.

Caractères d'identification : Le mycélium hyalin, siphonné, élabore très tôt des nématocystes plus ou moins lobulés ainsi que les gamétocystes. Les anthéridies paragynes fécondent des oogones globuleuses, mesurant 22-27 µm ; les zygotes apparaissent sur pastille de pétunia en 3 jours ; apleurotiques, ils mesurent 19-24 µm,

Biologie : parasite facultatif, cet oomycète est homothallic et la fécondation des gamétocystes (siphonogamie) produit des zygotes à paroi épaisse ; une partie du cycle biologique nécessite la présence d'eau liquide. La durée du cycle biologique asexué est inférieure à trois jours.

Facteurs extrinsèques : la croissance est maximum pour un niveau de température de 30-35°C.

Contrôle : des essais fongicides de premier degré, confirmés au deuxième degré, ont montré la supériorité du Thirame, de la Triforine et du Captafol pour contrôler *Pythium aphanidermatum*.

Position systématique

Phylum: Oomycota

Classe : Oomycetes

Ordre : Peronosporales

Famille : Pythiaceae

Genre : *Pythium*



Figure 16: Pythium root rots and blights. Root rot of Caladium (A right), barley seedlings (B left), blight of turfgrass (C), and root rot and wilt of tomato (D) caused by Pythium. [Photographs courtesy of (A) R. J. McGovern, (C) T. E. Freeman, and (D) Plant Pathology Department, University of Florida, and (B) L. J. Piening, WCPD.]

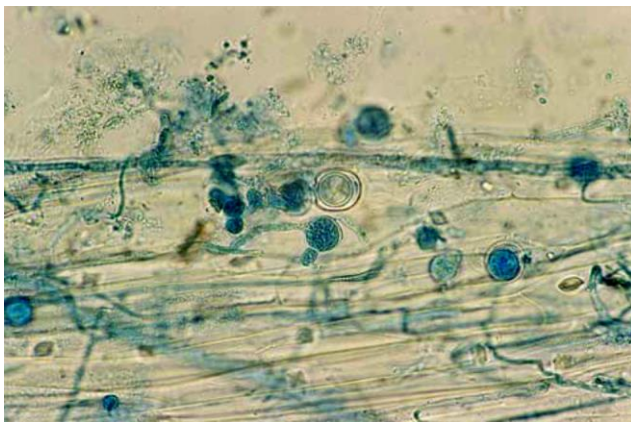


Figure 17: Pythium mycelium and sporangia in infected root tissue (A) and oospore (B) of Pythium.

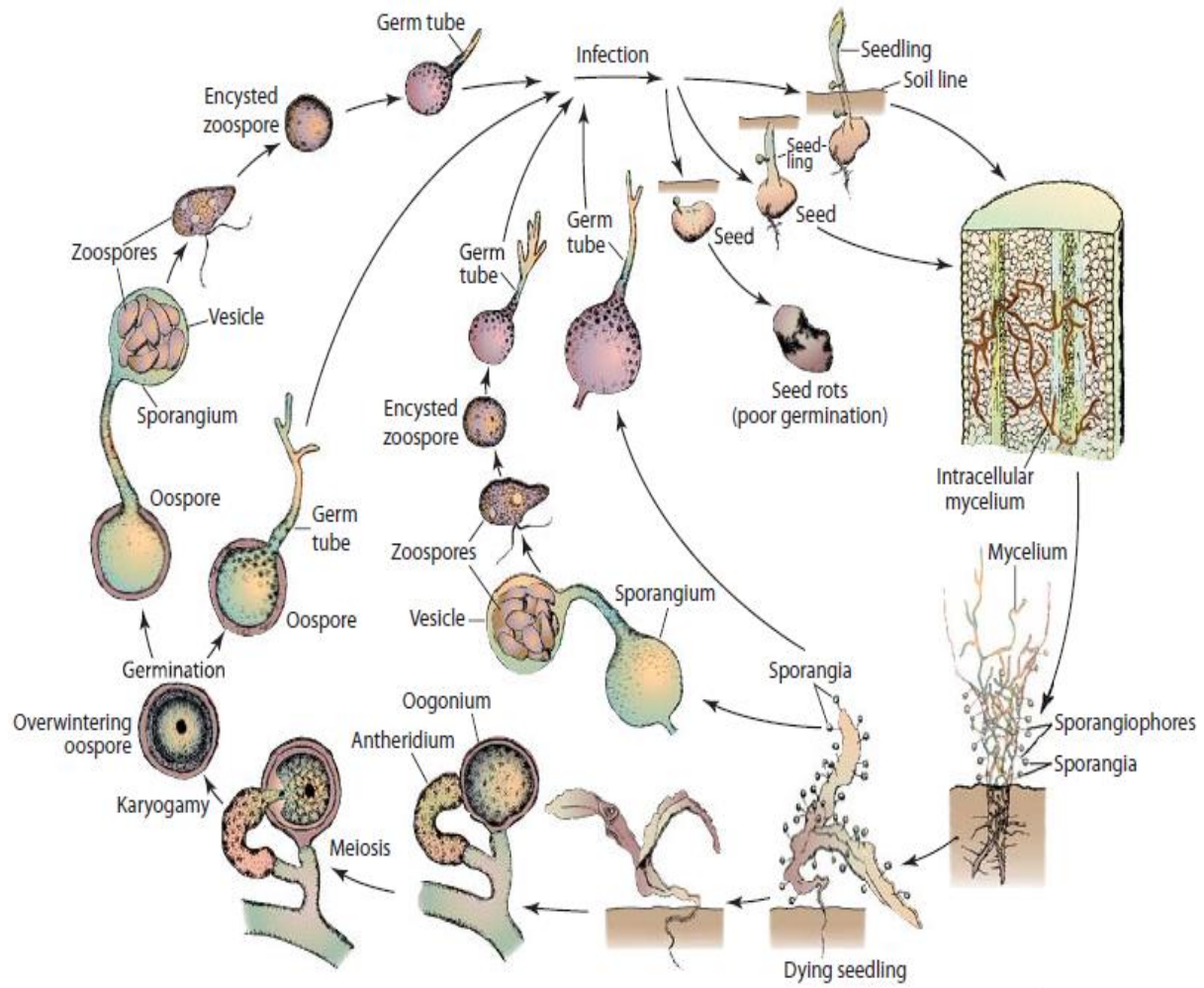


Figure 18: Disease cycle of damping-off and seed decay caused by *Pythium* sp.

10.5.1.5. *Rhizoctonia solani* Kühn

Synonymes : *Corticium solani* (Pril. et Delacr.) Bourd. et Galz., *Corticium vagum* Berk. et Cunn., *Pellicularia filamentosa* {PaL} Rogers, *Thanatephorus cucumeris* (Franck) Donk.

Maladies et hôtes : rhizoctone foliaire du haricot (*Phaseolus vulgaris*) rhizoctone de la laitue (*Lactuca sativa*). Agent de fontes des semis et pourriture du collet de nombreuses plantes maraîchères, c'est le plus ubiquiste et le plus polyxène des champignons pathogènes : arachide, bananier, caféier, canne à sucre, citrus, cotonnier, fraisier, gombo, hévéa, igname, jute, maïs, manguier, melon, patate, piment, poivron, pomme de terre, ricin, riz, roselle, tabac, tomate, etc.

Agression : feuilles, tiges, racines et fruits.

Dissémination : champignon stérile, sclérotés aériens.

Conservation : sclérotés souterrains et thalle sur débris végétaux.

Caractères d'identification : champignon stérile à microsclérotés. Son mycélium cloisonné, hyalin à l'état jeune, devenant brun clair à foncé, est constitué de cellules allongées, mesurant 80 -150 x 7-9 µm, et porte des ramifications latérales en général orthogonales, cloisonnées près de l'insertion. Souvent s'y juxtapose un thalle monalide, à articles courts renflés en tonnelets, qui évoluent pour former des stromas et des sclérotés, mal définis, atteignant 500 à 100 µm,

Biologie : champignon du sol ; la forme parfaite, qui appartient au genre *Corticium* (= *Thanatephorus cucumeris*),

Facteurs extrinsèques : les températures cardinales sont 9 x 28 x 42°C ; le pouvoir pathogène est lié à un degré hygrométrique élevé (> 90 %).

Facteurs intrinsèques : des travaux antérieurs ont permis de distinguer plusieurs entités à l'intérieur de *R. solani*. Deux formes parfaites, *Thanatephorus* et *Ceratobasidium*, rapportées chacune à une dotation nucléaire caractéristique (plusieurs noyaux par élément et exclusivement deux noyaux par élément) définissent deux rameaux distincts. Les races se

distinguent par des caractères physiologiques et biologiques, notamment l'aptitude à l'anastomose des thalles in vitro et la virulence sur différentes plantes-hôtes.

Contrôle : des essais fongicides de premier degré ont montré que des effets fongistatiques sont obtenus avec le Bénomyl, le curzate + Mancozèbe, le Dichlofluanide, le Fénarimol, la Triforine, et la plupart des dithiocarbamates.

Position systématique

Phylum: Basidiomycota

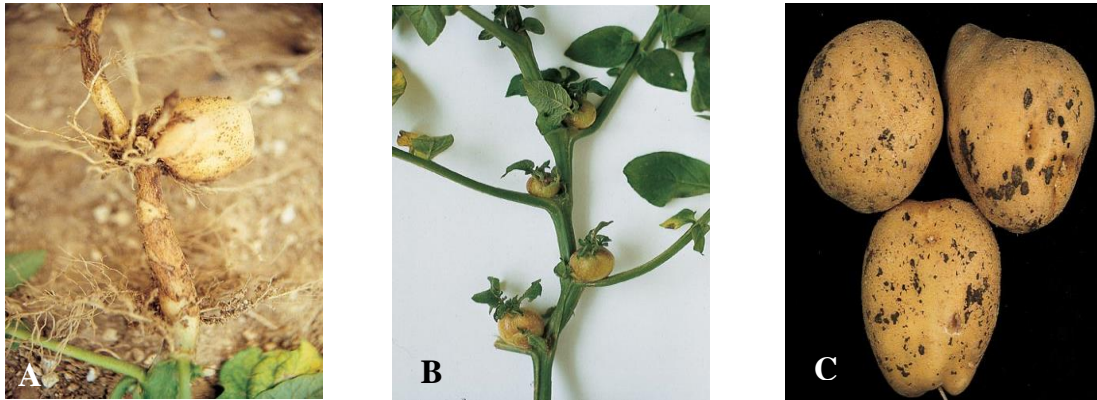
Subphylum: Agaricomycotina

Classe: Agaricomycetes

Ordre: Ceratobasidiales

Famille: Ceratobasidiaceae

Genre: Rhizoctonia



*Figure 19: Symptômes de Rhizoctonia solanien différentes phases de végétation
 A : En début de végétation, B : Pendant la période de végétation ; C : Les tubercules contaminés portent à la surface de petits amas noirs très durs, appelés sclérotés*

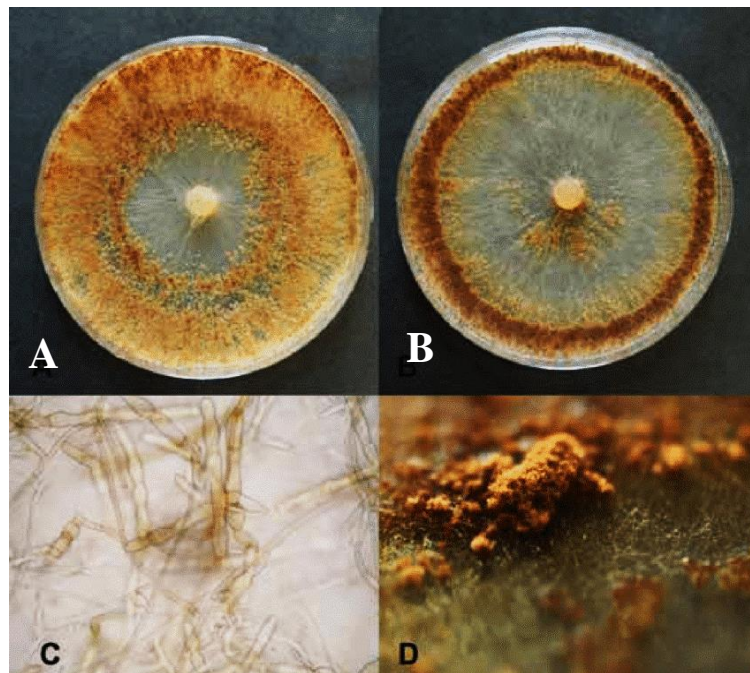


Figure 20: Rhizoctonia solani AG-2-2: Buff to dark brown colonies with abundant mycelia (A, B), monilioid cells (C), brown sclerotia formation (D) (Vojvodić, Lazić, Mitrović, Tanović, Vico, & Bulajić, 2019).

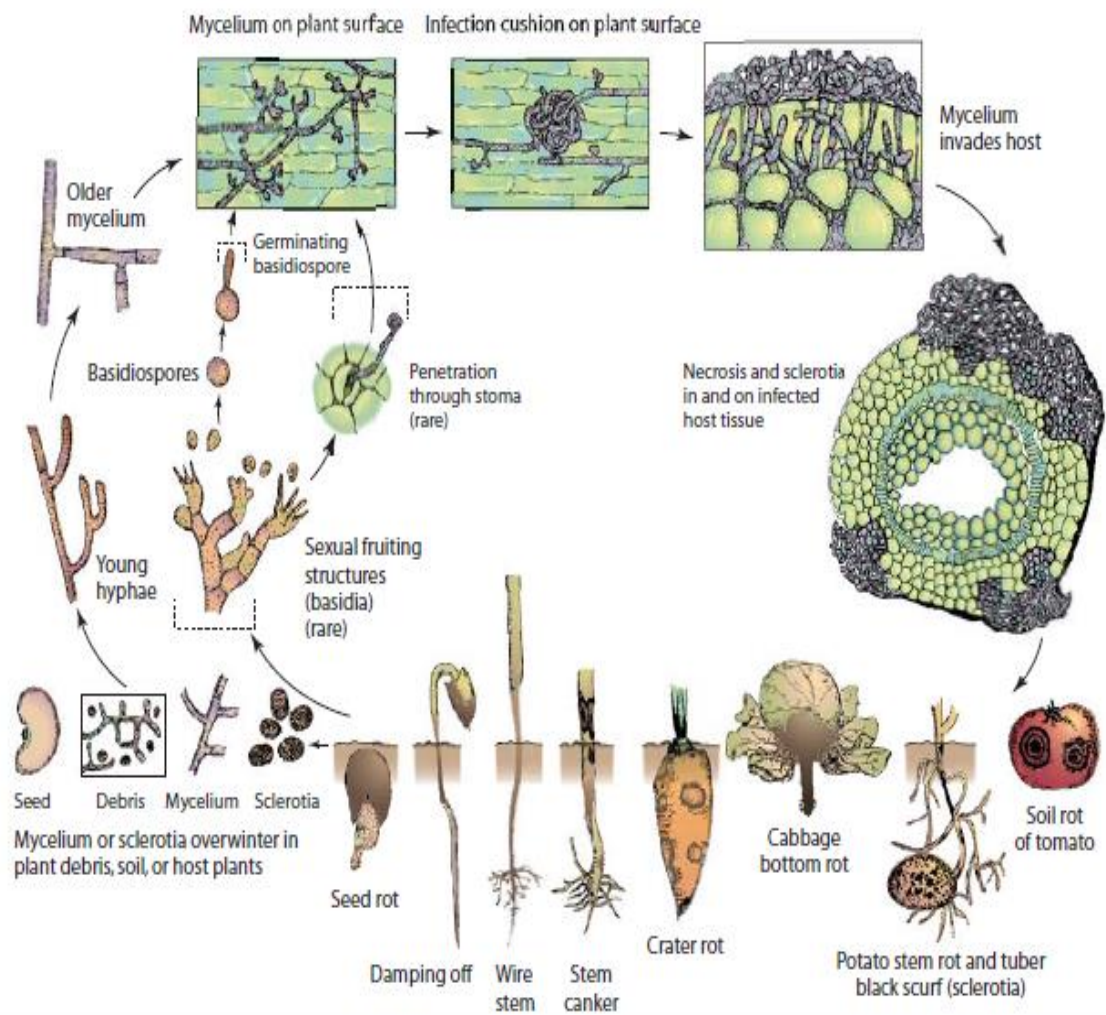


Figure 21: Cycle de vie de *Rhizoctonia solani* (*Thanatephorus cucumeris*).

10.5.1.6. *Uromyces appendiculatus* (Pers.) Lév.

Synonyme : *U. phaseoli* (Pers.) Wint.

Maladies et hôtes : rouille du haricot (*Phaseolus vulgaris*). Également sur *Vigna* spp. et *Dolichos*.

Agression : feuilles, tiges et filets, dessèchement des feuilles.

Dissémination : urédoconidies transportées par l'air.

Conservation : par les télétoconidies sur le sol.

Caractères d'identification : Les urédoconidies brun clair, unicellulaires, sessiles, à paroi mince et échinulée, mesurent 22-30 x 15-21 µm ; les télétoconidies pédicellées, unicellulaires, brunes, sphériques, à paroi épaisse peu verruqueuse, et dotées d'une papille apicale, 22-26 x 20-25 µm.

Biologie : parasite strict, cet *Uromyces* est une rouille autoïque, formant ses stades 5, I, II, et III sur *Phaseolus vulgaris*.

Facteurs intrinsèques : *Uromyces appendiculatus* n'a jamais été observé sur *Phaseolus lunatus*.

Variétés résistantes : California Small White 643,

Variétés très sensibles : les Pinto américaines.

Position systématique

Phylum : Basidiomycota

Ordre : Uredinales

Famille : Pucciniaceae

Genre : *Uromyces*.



Figure 22: Uromyces appendiculatus uredia development on both adaxial

10.5.1.7. *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici* Sn. et H.

Maladie et hôtes : fusariose de la tomate (*Lycopersicon esculentum*)

Agression : racines et système vasculaire de la tomate.

Dissémination : microconidies et macroconidies telluriques.

Conservation : chlamydoconidies et thalles sur débris de plantes infectées.

Caractères d'identification : Le mycélium est hyalin et cloisonné ; en culture sur milieu nutritif gélosé, on observe souvent une pigmentation rouge grenat du thalle (pigment parfois diffusible dans le milieu) ; les conidies sont hyalines et se présentent sous trois formes différentes :

Microconidies, allongées, parfois courbées, 2-4 x 4-13 µm ;

Macroconidies falciformes effilées aux extrémités, mesurant : (3 cloisons) 2,5-5 x 20-50 µm et (5 cloisons) 2,5-5 x 30-70 µm ;

Chlamydoconidies terminales et intercalaires, 3-5 µm.

Biologie : parasite facultatif, sans forme parfaite connue ; le champignon se disperse à la surface du sol et en profondeur.

Facteurs extrinsèques : les températures cardinales pour la croissance du champignon sont 9 x 27-28 x 37 °C. La maladie est favorisée par certaines compositions minérales du sol, excès en azote, carence en potassium, et faible teneur en calcium. Elle est plus fréquente sur sol humide et acide.

Facteurs intrinsèques : quatre races sont connues à l'intérieur de la forme spécialisée, les variétés différentielles sont Roma, Manalucie, Homestead, Oahu et les hawaïennes, en général résistantes à la race 1, avec une résistance verticale. La résistance est perdue s'il se produit une attaque concomitante de *Meloidogyne*, à moins que la variété ne possède également un gène de résistance à *Meloidogyne*. Un gène de résistance à la race 2 se trouve

dans les lignées Walter. La résistance caraïbe au wilt bactérien entraîne également la résistance à la race 2.

Contrôle : *Fusarium oxysporum* est contrôlé généralement par la voie génétique. Diverses tentatives visant à faire intervenir des éliciteurs, provenant de *Fusarium* plus ou moins proches, paraissent encourageantes pour l'avenir.

Position systématique

Classe : Deuteromycetes

Ordre : Moniliales

Famille : Tuberculariaceae

Genre : *Fusarium*

Espèce : *oxysporum*



Figure 23: Symptômes de la fusariose sur plante de tomate
Le jaunissement gagne plusieurs folioles situées sur un même côté de la feuille

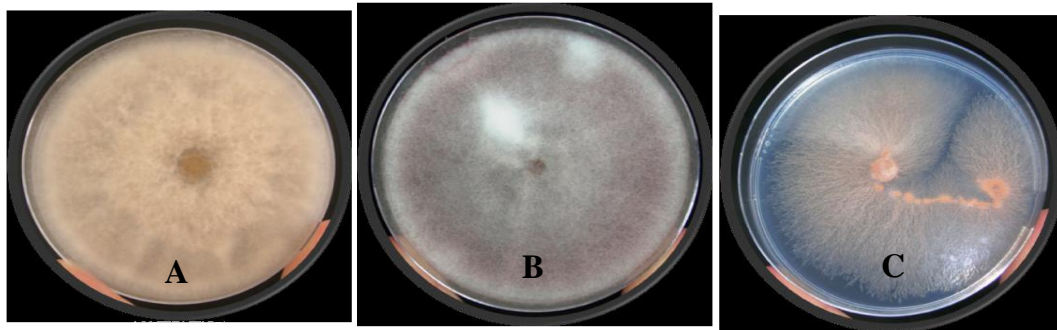


Figure 24: Différents aspects morphologiques des isolats de *Fusarium oxysporum*
A : Cotonneux ; B : duveteux ; C : ras muqueux

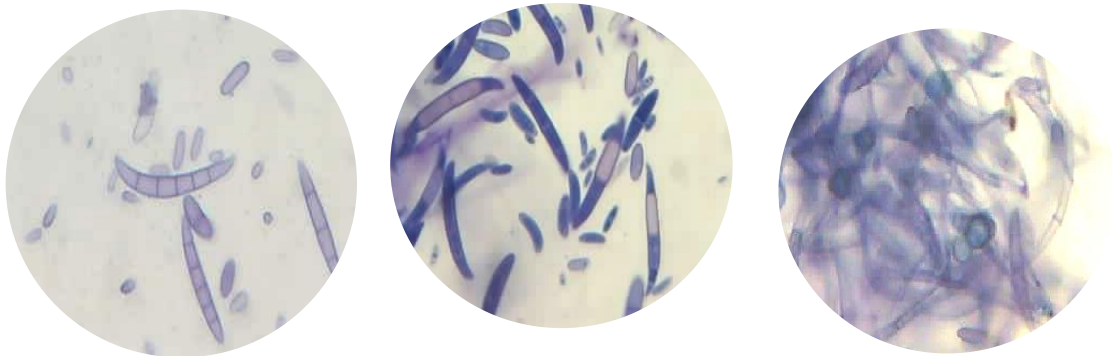


Figure 25: Observation microscopique de différents types de spores de *Fusarium oxysporum*

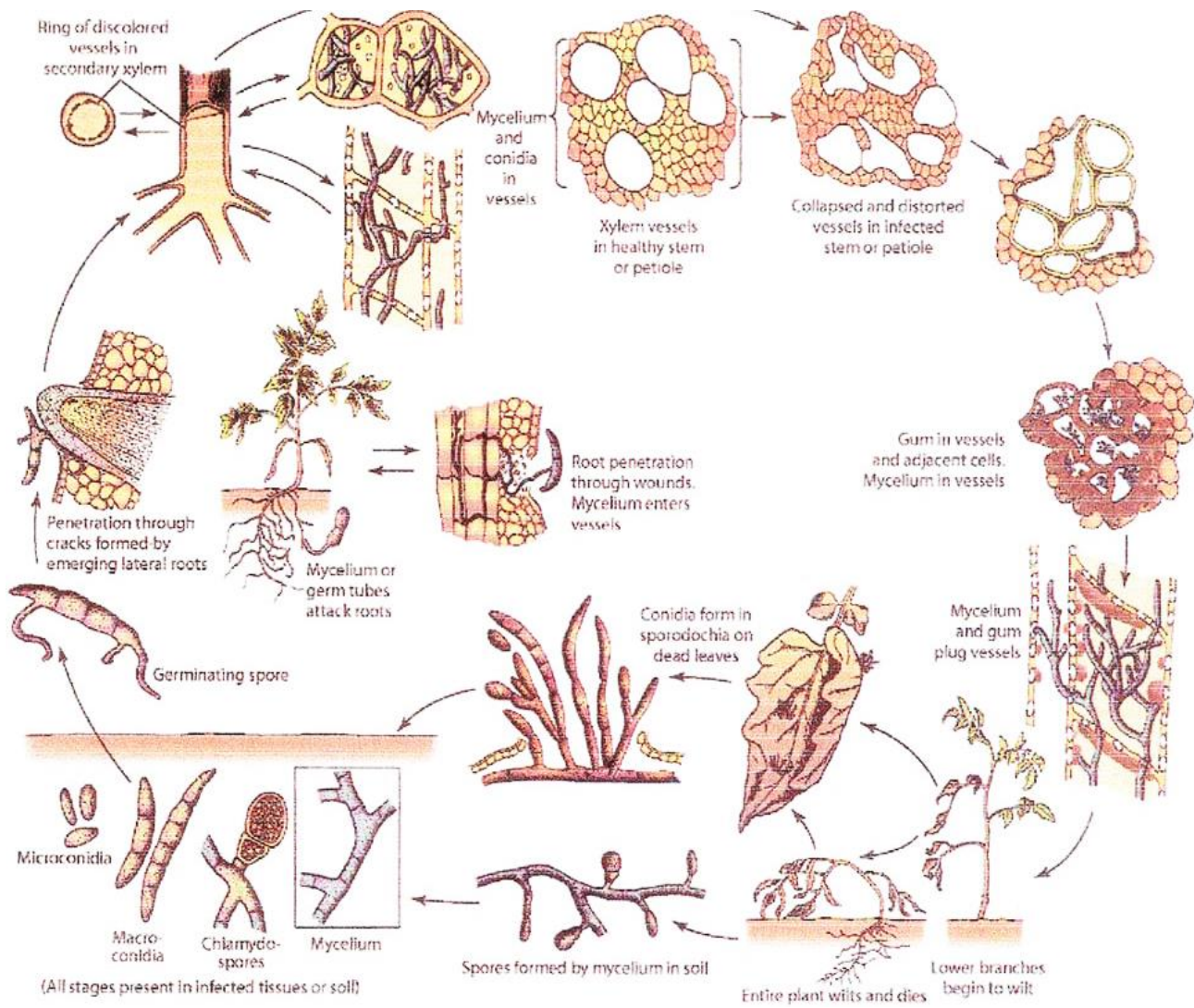


Figure 26: Cycle infectieux du *Fusarium oxysporum*

Bactéries phytopathogènes

Les bactéries sont organisées très simplement et ont une très grande adaptabilité écologique. Elles sont présentes partout dans la nature et remplissent souvent des fonctions écologiques importantes (p.ex. dégrader les matières organiques mortes ou fixer l'azote).

Leur taille est d'environ 0,001 mm, ce qui fait qu'on ne peut les voir que sous un bon microscope. Elles ont une forme de sphère, de bâtonnet ou de spirale. Certaines espèces sont pourvues de flagelles qui leur permettent de se déplacer.

Les bactéries se multiplient par division simple (division des cellules) et peuvent se répandre très rapidement grâce à la brièveté de leur intervalle de génération (temps séparant une division cellulaire de la suivante).

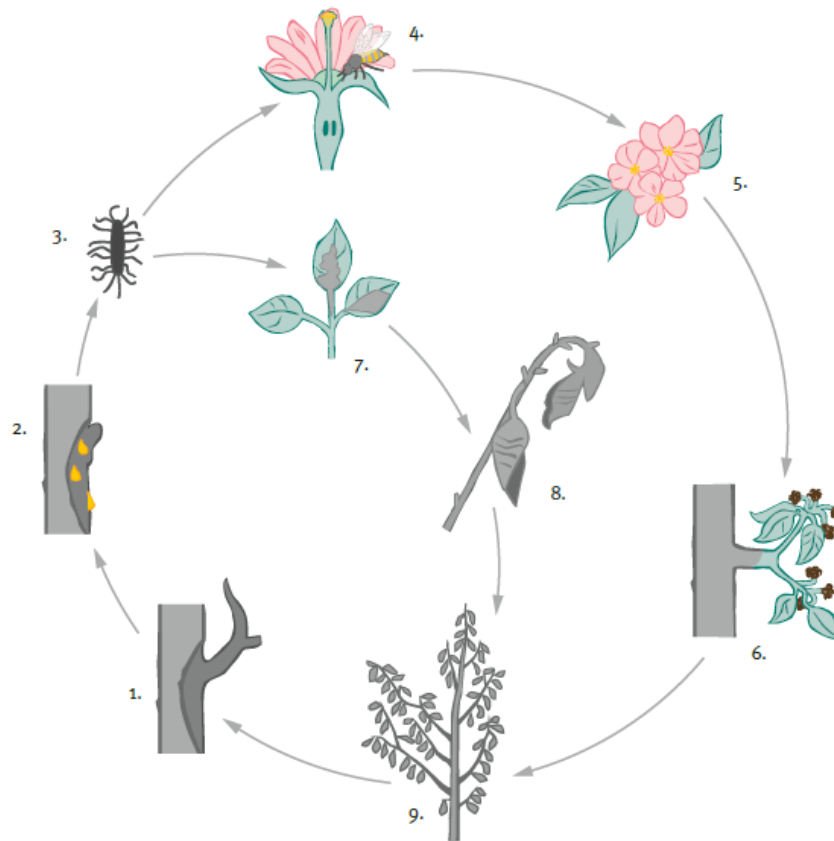
Lorsque les conditions sont favorables, une seule bactérie peut en une nuit générer une population d'un million d'individus. D'une part, tous les organismes vivants dépendent de la présence de bactéries (que ce soit pour pourvoir en substances de base comme le font les bactéries mycorhiziennes ou pour agir sur le métabolisme de substances nécessaires à l'organisme comme le font les entérobactéries chez l'homme), et d'autre part les hommes, les animaux et les plantes peuvent être victimes de graves maladies provoquées par de nombreuses bactéries.

Biologie des bactéries phytopathogènes

Les bactéries ne peuvent pas pénétrer dans un tissu végétal sain et intact. Elles entrent par les stomates, les lenticelles (ouvertures dans l'écorce des plantes ligneuses) ou des blessures. La transmission d'une plante à l'autre peut se faire de multiples manières : par des personnes, des outils, des animaux, des graines, des parties de plantes, le vent, l'eau ou le sol.

La multiplication et la dissémination des bactéries sont favorisées par des températures de 25 à 30 °C et par une humidité élevée. La liste des plantes pouvant être affectées par des maladies bactériennes est longue. On a décrit environ 400 maladies créant des problèmes souvent importants dans plus de 70 familles de plantes. Voici les maladies les plus redoutées par les horticulteurs :

Figure
vie du feu



27: Cycle de
bactérien.

1. Hivernage dans le chancre.
2. Le mucilage bactérien est exsudé au printemps.
3. Bactérie en forme de bâtonnet, flagellée (*Erwinia amylovora*).
4. Les insectes pollinisateurs transmettent le mucilage bactérien.
5. Inflorescences infectées sans symptômes.
6. Premiers symptômes sur des inflorescences après 2 à 4 semaines.
7. Infection de jeune rameau à la faveur de fissures de croissance ou de blessures (p.ex. dues à la grêle).
8. Premiers symptômes sur rameaux après 2 à 6 semaines.
9. Dépérissement de rameaux ou d'arbres entiers.

La maladie des taches huileuses (*Xanthomonas begoniae*) du bégonia La face inférieure des feuilles se couvre de taches huileuses, translucides, claires au centre, qui brunissent et se dessèchent ensuite. Les surfaces touchées se situent surtout entre les nervures.

La bactériose des feuilles et des tiges (*Xanthomonas pelargoni*) du pélargonium Les jeunes feuilles des pélargoniums flétrissent puis se dessèchent et tombent dès qu'on les touche. On voit sur les pousses un brunissement translucide des vaisseaux. En cas de forte attaque, on voit aussi des plages de pourriture d'où sort un liquide orange-rouge.

Le chancre bactérien Proliférations cellulaires tumorales aux pousses ou aux racines de chrysanthèmes, d'arbres fruitiers ou de rosiers.

Le feu bactérien (*Erwinia amylovora*) Les plantes atteintes présentent d'abord des signes de flétrissement. Les pointes des rameaux touchés se courbent en crosses. Les feuilles deviennent brunes à noires et coriaces, mais ne tombent pas. Le feu bactérien est en Suisse une maladie qui doit obligatoirement être déclarée. En cas de soupçon d'attaque, l'office cantonal de la protection des plantes ou le responsable communal du feu bactérien doit être informé. On trouve des informations toujours actuelles et des adresses utiles sous www.feuerbrand.ch.

Lutte contre les bactéries Il n'existe à ce jour aucun moyen de lutte direct, si l'on excepte la streptomycine que les producteurs peuvent utiliser contre le feu bactérien, moyennant une autorisation spéciale. Les mesures préventives ont donc la priorité, particulièrement l'hygiène (désinfection régulière des substrats, des pots, des places de travail, des outils et des mains). Il est recommandé d'éviter les excès d'arrosage et de fumure, les blessures et l'humidité stagnante sur le feuillage. Les plantes malades ou douteuses doivent être immédiatement éliminées. Les traitements cupriques ont un effet préventif, en empêchant les bactéries de pénétrer dans les plantes. Ils n'ont toutefois pas d'effet curatif.

Tableau 3: Plantes hôtes du feu bactérien

Fruits à pépins	
<i>Cydonia</i>	Cognassier
<i>Malus</i>	Pommier, y compris les pommiers d'ornement
<i>Pyrus</i>	Poirier, y compris les poiriers d'ornement et les nashis
Arbres et arbustes d'ornement	
<i>Chaenomeles</i>	Cognassier à fleurs
<i>Cotoneaster</i>	Cotonéaster (diverses espèces), plantation interdite dans toute la Suisse
<i>Mespilus</i>	Néflier commun
<i>Pyracantha</i>	Pyracanthé, buisson ardent
<i>Photiniadavidiana</i> (<i>Stranvaesia</i>)	Photinia. plantation interdite dans toute la Suisse
<i>Eriobotrya</i>	Néflier du Japon (loquat)
Arbres et arbustes sauvages	
<i>Crataegus</i>	Aubépine
<i>Sorbus</i>	Sorbier, alisier, allouchier
<i>Amelanchier</i>	Amélanchier, peu sensible

Produits phytosanitaires biologiques : *Bacillus subtilis* (Serenade), levures. Les traitements préventifs durant la floraison des arbres fruitiers diminuent les attaques du feu bactérien (Frutschi, Oeschberg, Gut, Wallierhof, & Stüssi, 2014).

Caractères généraux (bactéries et molliculites) phytopathogènes

Les procaryotes regroupent l'ensemble des organismes unicellulaires ne possédant pas de noyau différencié. Parmi les procaryotes phytopathogènes, on distingue les bactéries sensu stricto pourvues d'une paroi et les molliculites (phytoplasmes et spiroplasmes). Cette paroi, chez les bactéries, est rigide et entourée d'une couche muqueuse (capsule). Elle joue un rôle important dans les processus de reconnaissance qui déterminent le devenir de la relation parasitaire. Les bactéries phytopathogènes sont pourvues d'une membrane cytoplasmique, leur matériel chromosomique se présente sous forme d'une plage irrégulière dans le cytoplasme et elles possèdent des fragments d'ADN circulaires. Elles sont en outre dotées de structures extérieures à la paroi (capsules, polysaccharides, etc.) qui jouent un rôle

de fixation, de protection ou qui sont impliqués dans leur mouvement. La mobilité de ces cellules est assurée par des flagelles qui répondent à un stimulus chimique extérieur (chimiotactisme). Il existe des classifications phénotypiques et des classifications moléculaires des procaryotes, s'appuyant sur des caractères morphologiques et biochimiques.

3.4.2. Systèmes de classification Il existe des classifications phénotypiques et des classifications moléculaires. Les premières s'appuient traditionnellement sur des caractères morphologiques et biochimiques mais leur caractère peu discriminant réduit leur utilisation pratique. Les propriétés physiologiques et métaboliques sont plus largement utilisées pour autant que le microorganisme puisse être cultivé dans les milieux de culture requis. Les techniques moléculaires ciblant les séquences en acides nucléiques connaissent un essor considérable pour résoudre les problèmes d'identification.

Taxonomie

Il existe aussi des niveaux taxonomiques en usage dans la classification des procaryotes phytopathogènes (voir Tableau suivant). La première subdivision établie au sein des bactéries repose sur la coloration de Gram (coloration des parois de la bactérie : si oui, « Gram+ », si non « Gram»). Niveaux taxonomiques utilisés dans la classification des procaryotes phytopathogènes.

Niveaux Rang taxonomique Nomenclature

Niveaux supra spécifiques	Domaine	Règne	Section	Classe	Ordre	Famille	Genre	Espèce
Bacteria		(Eubacteria)		Proteobacteria				-
Proteobacteria	Zymobacteria	Pseudomonadales	Pseudomonadales				Pseudomonas	
Pseudomonas	syringae	Niveaux intraspécifiques	Pathovar	Race (ou biotype)			<i>Pseudomonas</i>	
							<i>syringaepv. tabaci</i>	

Principaux taxons et maladies provoquées par les bactéries phytopatogènes

Au sein des bactéries Gram-, les Proteobacteria constituent un groupe très diversifié. Il contient 4 sections (, , , et), comprenant des agents phytopathogènes : 1. La section des - Proteobacteria renferme les genres *Agrobacterium* et *Rhizobium* (groupe des bactéries

vasculaires responsables de flétrissement dus à l'occlusion des vaisseaux par les bactéries elles-mêmes). Mis en contact avec une blessure d'une plante hôte sensible, *A. tumefaciens* introduit dans les cellules de la plante un fragment d'ADN qui code pour la prolifération des cellules végétales (tumeurs sur arbres fruitiers et en pépinière). 2. Les genres *Burkholderia* et *Ralstonia* sont classés dans la section des - *Proteobacteria*. Les bactéries appartenant au premier genre induisent des symptômes de pourritures, de flétrissements ou de nécroses. Parmi ces bactéries, *Ralstonia solanaceae* est responsable de maladies vasculaires sur de nombreuses cultures en régions tropicales. 3. La section des -*Protéobacteria* contient les genres *Pseudomonas*, *Erwinia*, *Pantoea* et *Xanthomonas*. Les bactéries du genre *Pseudomonas* sont responsables de nécroses foliaires ou de dépérissement des rameaux. Le genre *Erwinia* est responsable d'importantes maladies des plantes (le groupe des agents causant des pourritures molles et le groupe « amylovora », le feu bactérien). L'espèce *Xanthomonas campestris* est ubiquiste et comporte plus d'une centaine de pathovars. Enfin, cette section contient l'espèce *Xylella fastidiosa*, non cultivable sur milieu et qui colonise le xylème.

La section des -*Proteobacteria* contient plusieurs espèces de bactéries inféodées au phloème. C'est le cas des *Liberobacter* responsables du « greening » (verdissement) des Citrus en Afrique du Sud notamment et transmis par des psylles. Les bactéries Gram+ contiennent la section des *Clostridia* (bactéries anaréobies) et la section des molliculites contenant les phytoplasmes et les spiroplasmes. Les maladies à phytoplasmes sont particulièrement importantes dans les pays tropicaux en raison de l'activité ininterrompue des insectes vecteurs. Les phytoplasmes occasionnent des symptômes affectant l'appareil reproducteur ainsi que l'appareil végétatif (pourritures molles). Les principaux symptômes induits par les spiroplasmes sont le nanisme, des chloroses, des jaunisses, une réduction de la taille des fruits et des feuilles ainsi que des flétrissements. Deux types de spiroplasmes sont connus ; le premier type possède dans la nature un nombre limité de plantes hôtes et le second possède un très large spectre de plantes hôtes. On retrouve aussi au sein de ces bactéries Gram+ , les *Corynébactéries* dont les espèces les plus dommageables sont

Clavibacter michiganensis ssp. *sepedonicum* provoquant la maladie annulaire de la pomme de terre tandis que *C. michiganensis* ssp. *michiganense* cause le flétrissement (chancre bactérien) de la tomate. Ce groupe contient également le genre *Streptomyces*.

Cycle parasitaire des bactéries

Les bactéries établissent avec les plantes une gamme de relations allant de la symbiose au parasitisme mais la distinction entre parasitisme et saprophytisme n'est pas tranchée. La dynamique épidémique exige l'enchaînement de plusieurs événements qui constituent le cycle infectieux de base : phase de conservation de l'inoculum, phase d'infection et phase de dispersion (figure ci-dessous). Les phases essentielles du cycle infectieux de base chez les bactéries phytopathogènes. (Schiffers & Moreira)

Tableau 4: Classification simplifiée des procaryotes phytopathogènes (Bailly, et al., 1990)

Présence d'une paroi rigide entourant la membrane cytoplasmique	
Coloration de Gram Positive	
<i>Firmicutes (synfirmacutes)</i>	
<i>Bactéries corynéiformes</i>	<i>Corynebacterium</i> <i>Clavibacter</i> <i>Curtobacterium</i>
<i>Bactéries nocardiformes</i>	<i>Rhodococcus</i>
<i>Streptomycétacées</i>	<i>Streptomyces</i>
Coloration de Gram négative	
<i>Gracilicutes</i>	
<i>Pseudomonadacées</i>	<i>Pseudomonas</i> <i>Xanthomonas</i>
<i>Rhizobiacées</i>	<i>Agrobacterium</i>
<i>Enterobactériacées</i>	<i>Erwinia</i>
Présence d'une paroi imparfaite semi-rigide	
<i>Mendocicutes</i>	
<i>Germes vivant dans des environnements extrêmes : méthanogènes, thermoxidophiles</i>	
Absence de paroi	
<i>Ténéricutes (classe des Mollicutes)</i>	
<i>Spiroplasmatacées</i>	<i>Spiroplasma</i>
<i>Organismes de type mycoplase (Mycoplasma like organisms : MLO)</i>	
Organismes d'affiliation incertaine	
<i>Germes de très petites dimensions mis en évidence récemment au niveau du tissu vasculaire des plantes malades et désignés sous le nom de Fastidiousvascularbacteria (FVB) ou des Rickettsia like organisms (RLO)</i>	

Parmi les bactéries phytopathogènes, quelques-unes sont capables d'attaquer un grand nombre d'espèces cultivées. Liste des bactéries phytopathogènes (*Agrobacterium* ; *Clavibacter* ; *Curtobacterium* ; *Erwinia* ; *Pseudomonas* ; *Rhodococcus* ; *Xanthomonas*)

Erwinia carotovora var. *atroseptica* (Van Hall) Dye

Erwinia carotovora var. *carotovora* (Jones) Dye

Maladies et hôtes : jambe noire de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*).

Agression : stolons et tiges aériennes, tubercules (pourriture noire humide).

Dissémination : par l'eau d'irrigation (dissémination possible par insectes et vers).

Conservation : sol et tubercules infectés.

Caractère d'identification : bactérie Gram négative, en bâtonnets de 1,5 x 0,7 µm, dotée de flagelles péritriches, ne formant pas de spores enkystées.

Biologie : elle peut mener une vie saprophytique dans le sol pendant un certain temps, plus long en conditions humides et fraîches.

Elle pénètre par les lenticelles, les craquelures et les blessures.

Facteurs extrinsèques : Les deux variétés, *atroseptica* et *carotovora*, se cultivent in vitro jusqu'à 36°C, mais il a été constaté qu'au-delà de 20 °C *atroseptica* contamine très rarement les tubercules de semence. La variété *carotovora* est la principale cause de la jambe noire en région tropicale, où la température du sol atteint 30° C.



Figure 28: Black leg symptom caused by *Erwinia carotovora* infection, [b] *Erwinia carotovora* subsp. *atroseptica* - Black Leg (Soft Rot) of Potato, [c] Lesions associated with lenticel on a potato tuber caused either by *Erwinia carotovora* pv. *atroseptica*, or *Erwinia carotovora* pv. *carotovora*. (Rajneesh, Avinash, & Prabhat, 2013).

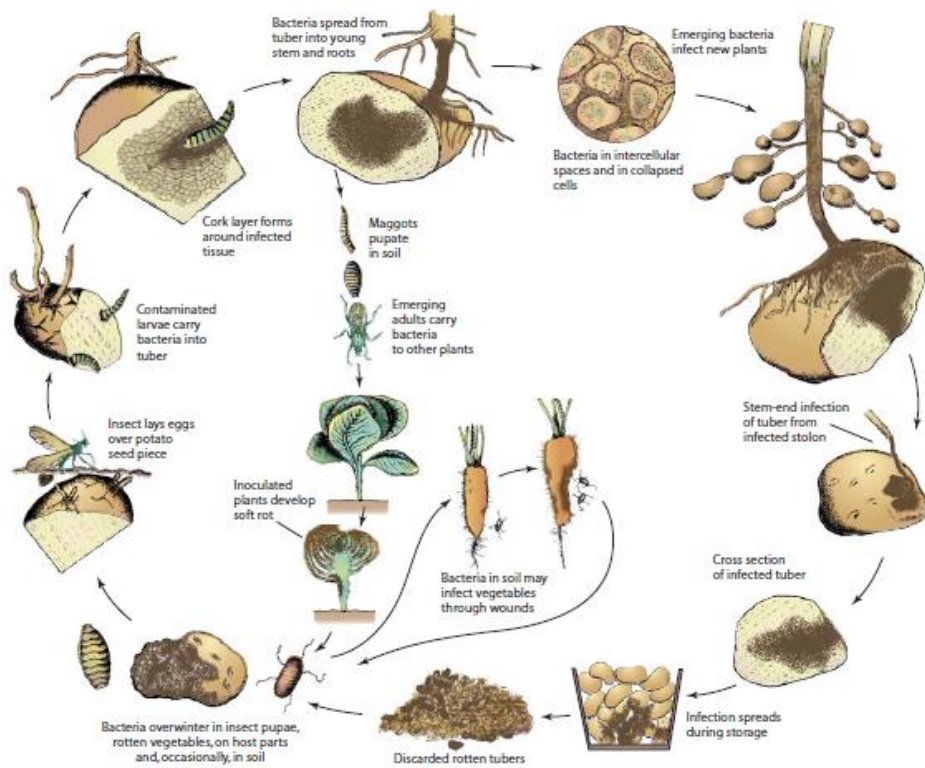


Figure 29: Cycle de vie de *Erwinia carotovora*

10.6. *Pseudomonas syringae* E. F. Sm.

Synonyme: *Bacterium solanacearum* E. F. Sm.

Maladies et hôtes : flétrissement bactérien de l'aubergine (*Solanum melongena*), flétrissement bactérien de la tomate (*Lycopersicon esculentum*). Probablement la plus ubiquiste et la plus polyphage des bactéries phytopathogènes, elle a été signalée sur : arachide, bananier, corchorus, cotonnier, haricot, *Hibiscus* spp., jute, manioc, melon, patate, poivron et piment, pomme de terre, soja, ricin, tabac, vanillier, etc.

Agression : feuilles, tiges, racines.

Dissémination : bactéries transportées par l'air et l'eau.

Conservation : dans le sol.

Caractère d'identification : cette bactérie se présente sous forme de courts bâtonnets, souvent associés par paire ou isolés, rarement en chaîne, mesurant 1,5 x 0,5 μm , et mobile grâce à des flagelles, 3-5 μm , disposées en bouquet unipolaire. Bactérie aérobie, produisant sur milieu gélosé nutritif de petites colonies muqueuses blanches, opalescentes et brillantes, diffusant un pigment jaune. Cette bactérie est Gram-négative, capable d'utiliser le glucose par voie oxydative, mais ne réduit pas les nitrates.

Biologie : souvent saprophyte dans le sol, *Pseudomonas solanacearum* est un parasite facultatif, pénétrant par les blessures (piqûres des racines par *Meloidogyne*). Elle se multiplie activement dans le xylème, par lequel elle envahit toutes les parties aériennes, et secondairement s'étend à la moelle et au parenchyme, provoquant des macérations colorées.

Facteurs extrinsèques : les températures cardinales pour le développement sont 10 x 32 x 35°C.

Facteurs intrinsèques : l'existence de races physiologiques, ayant une affinité particulière pour certaines plantes cultivées, a été mise en évidence : un premier pathotype attaque le bananier, un second les solanacées.

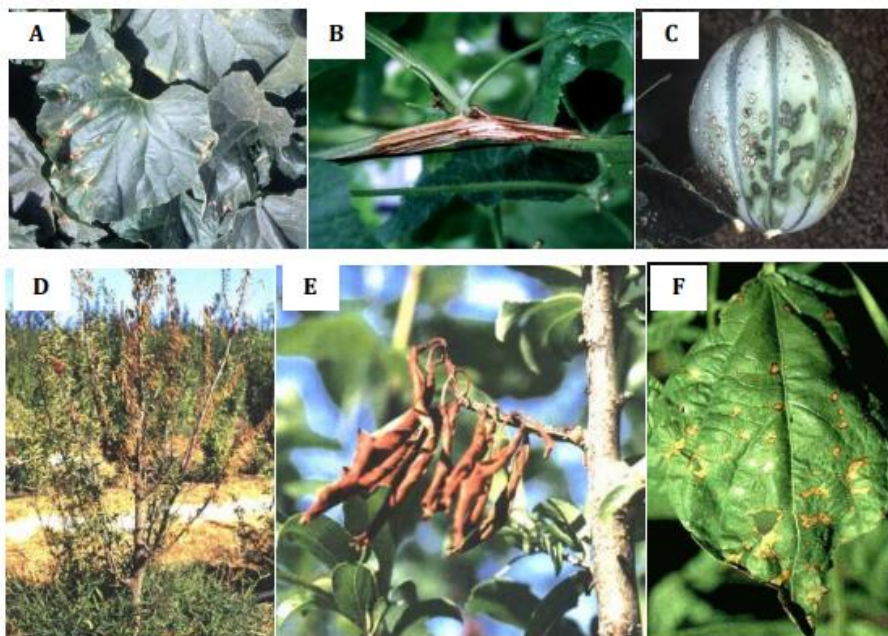


Figure 30: Exemples de symptôme causés par l'espèce *P. syringae* (Monteil, 2011)
 (A-C) Nécroses foliaires, sur tige et sur fruit causées par *P. syringae*pv. *apatata* sur melon
 (*Cucumismelo*)
 (D-E) Feu bactérien et mort d'un prunier causé par *P. syringae*pv. *mosprunorum*,
 (F) Nécroses foliaires sur haricot dues à *P. syringae*pv. *syringae*

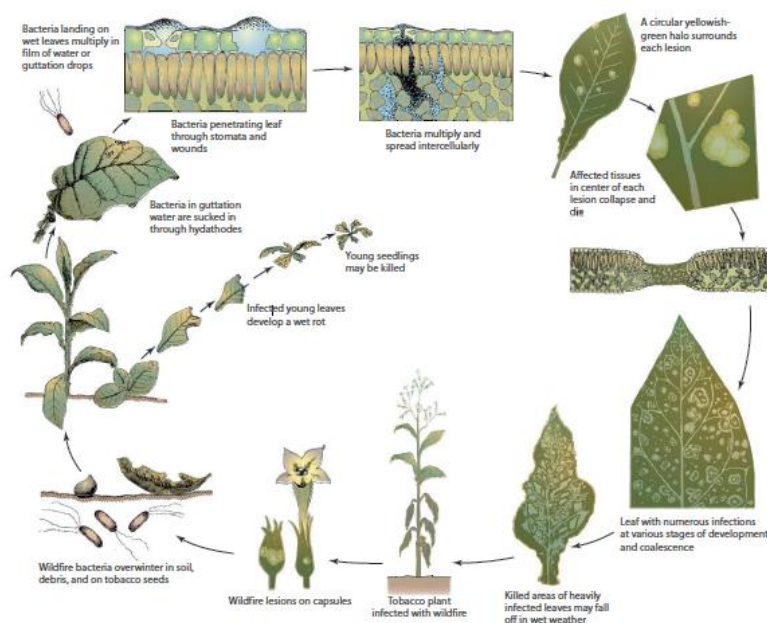


Figure 31: Cycle de vie de *Pseudomonas syringae*

10.7. *Xanthomonas*

Maladies et hôtes Le chancre bactérien ou chancre citrique, causé par *Xanthomonas campestris pv. citri* (X.c.c), est l'une des maladies les plus sérieuses affectant les agrumes. Originnaire du Sud Est asiatique ou de l'Inde, la maladie est endémique en Orient. Elle constitue une véritable menace pour l'agrumiculture dans les pays où le chancre ne sévit pas encore ou a été éradiqué.

Agression : feuilles, tiges, racines.

Dissémination : bactéries transportées par l'air et l'eau.

Conservation : dans le sol.

Caractère d'identification : Description et caractéristiques biochimiques *X. citri* sous-esp. *citri* est une bactérie à Gram négatif, droite, en forme de bâtonnet, qui mesure $1,5-2,0 \times 0,5-0,75 \mu\text{m}$. Elle est mobile grâce à un flagelle polaire unique. Un grand nombre de ses propriétés physiologiques et biochimiques sont communes aux autres membres du genre *Xanthomonas*. Elle est chimioorganotrophe, aérobie stricte et dotée d'un métabolisme oxydatif du glucose. Le pigment jaune est la xanthomonadine. Certaines des caractéristiques biochimiques qui permettent d'identifier *X. citri* sous-esp. *citri* sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 5::Principales caractéristiques biochimiques de *Xanthomonas citri* sous-esp. *citri*

Test	Résultat
Catalase	+
Oxydase	– ou faible
Réduction des nitrates	–
Hydrolyse :	
de l'amidon	+
de la caséine	+
du Tween 80	+
de l'esculine	+
Liquéfaction de la gélatine	+
Liquéfaction du gel de pectate	+
Utilisation de l'asparagine	–
La croissance demande :	

	<i>de la méthionine</i>	+
	<i>de la cystéine</i>	+
	<i>du chlorure de triphényltétrazolium (TTC) à 0,02%</i>	-

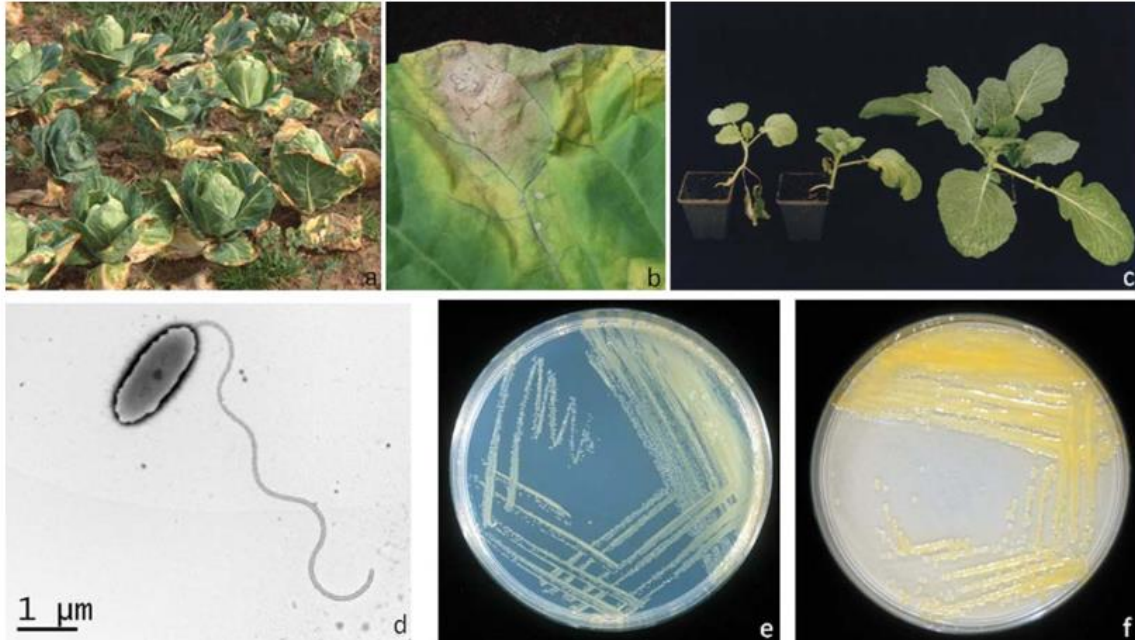


Figure 32: Xanthomonas campestris pv campestris

Symptoms of black rot on a cabbage field. (b) Typical black rot V-shaped lesion on a cabbage leaf. (c) Two plants of Savoy cabbage with symptoms of systemic infection following inoculation of Xanthomonas campestris pv campestris, and a healthy control plant. (d) Electron microscopy image of a X. Campestris pv.campestris rod-shaped cell showing a single polar flagellum. (e) Xanthomonas campestris pv campestris culture growing on King's medium B. (f) Xanthomonas campestris pv campestris culture growing on Yeast Dextrose Calcium Carbonate medium.

(VICENTE & HOLUB, 2013).

Les maladies provoquées par des virus

Les maladies à virus ou viroses prennent une grande importance économique en raison de la multitude des espèces végétales sensibles. Elles déterminent une diminution de la vigueur des plantes et une baisse des rendements.

Un peu d'histoire

Selon Inouye et Osaki (1980), la plus ancienne référence de symptôme viral sur plante ornementale daterait du VIII^e siècle. Un poème japonais, écrit par l'Impératrice Kolcen en l'an 752 de notre ère, parle de « feuille jaune » de l'eupatoire, ce qui pourrait correspondre à une infection par le virus du jaunissement des nervures reconnue seulement en 1979 sur la variété *Eupatorium chinense simplicifolium*. Plus près de nous, en Europe, l'exemple le plus souvent cité est celui de la tulipe infectée par le virus de la panachure.

Les symptômes, décrits dès 1576 par Charles de l'Ecluse ont été souvent représentés dans les compositions florales des peintres flamands du XVII^e siècle (tulipes flammées « Rembrandt »). La panachure foliaire de l'Abutilona été mentionnée en 1869 par Morren avant que son caractère infectieux ne fût reconnu par Bauren 1906.

En 1894, Dod, en Grande-Bretagne décrit la maladie des striures jaunes du narcisse, due au *Narcissus yellow stripe virus* (NYSV) qui sera étudiée aux Pays-Bas par Van Slogteren et De Bruyn Outboter en 1946. La première mosaïque sur œillet fut signalée aux Etats-Unis par Peltier en 1916 et une mosaïque sur cinéraire par Dickson en 1920 au Canada. La mosaïque du dahlia est connue depuis 1923 (Howe) et celle du rosier depuis 1928 (McWhorter).

Avant que l'étiologie exacte de ces maladies virales ait été reconnue, on parla longtemps à leur propos de « maladies de dégénérescence », car les plantes atteintes, multipliées végétativement, présentaient un affaiblissement général de plus en plus prononcé au fil des générations (Albouy & Devergne, 1998).

Classification des virus des plantes

La classification générale des phytovirus proposée par le Comité international pour la taxinomie des virus (International Committee on Taxonomy of Viruses ICTV) est la même que celle adoptée pour les virus des animaux et comporte cinq catégories de taxons:

*l'ordre,
la famille,
le genre,
l'espèce et
la séquence.*

Cette classification repose sur la structure de l'information génétique et sur la stratégie de répllication et de traduction. Comme les virus ont utilisé tous les types de polynucléotides en une seule molécule ou en plusieurs pièces cette classification répartit les phytovirus dans les six catégories de génomes, dont les cinq suivants concernent les Solanacées :

- *virus à ADN un brin en une ou plusieurs molécules circulaires et ADN-polymerase ;*
- *virus à ADN deux brins circulaire sans gène de réplicase directe, mais avec un gène de transcriptase inverse qui transcrit l'ARN en ADN ; cet ADN est intégré dans celui de la cellule hôte pour être transcrit (virus Manicle);*
- *virus à ARN deux brins en plusieurs segments et ARN-polymérase :*
- *virus à ARN un brin négatif qui doit être transcrit en ARN positif complémentaire messenger par une ARN-polymérase présente dans la particule ;*
- *virus à ARN un brin positif qui est un ARN messenger et ARN-polymérase.*

Ces catégories ou « phylum », n'ont pas de valeur taxinomique. Au contraire, le taxon du niveau de l'ordre a été créé pour regrouper les familles ou superfamilles phylogénétiquement apparentées. Dans l'ensemble des virus seuls trois ordres ont été actuellement définis et seul celui des Mononégavirus (ARN un brin négatif) renferme des phytovirus comme les Rhabdoviridae qui infectent les Solanacées (Tableau 1).

Tableau 6: Différenciation des 31 genres de virus affectant les Solanacées selon les critères morphologique des particules, complété par le mode de vection

Virus non-enveloppés	Genres
Particules isométriques parasphériques	
25-30 nm de diamètre — Aspect arrondi	
Virus transmis par pucerons sous le mode non-persistant	
Génome bipartite	<i>Fabavirus</i>
Génome tripartite	<i>Cucumovirus</i>
Aspect hexagonal	
Virus transmis par pucerons sous le mode persistant	
Génome monopartite	<i>Luteovirus</i> <i>Polerovirus</i>
Virus transmis par champignons du sol	<i>Necrovirus</i>
Virus transmis par contact, champignons, graines	<i>Tombusvirus</i>
Aspect hexagonal et particules vides	
Virus transmis par altises	<i>Tymovirus</i>
Virus transmis par chrysomélidés	<i>Comovirus</i>
Virus transmis par chrysomélidés ou par punaises	<i>Sobemovirus</i>
Virus transmis par nématodes	<i>Nepovirus</i>
30-40 nm	
Virus transmis par le pollen et la graine	<i>Alphacryptovirus</i>
50 nm	
Virus transmis par pucerons	<i>Caulimovirus</i>
65 nm avec double capside	
Virus transmis par cicadelles	<i>Phytoreovirus</i>
Particules géminées 18 × 30 nm	
Virus transmis par aleurode <i>Bemisia tabaci</i>	<i>Begomovirus</i>
Virus transmis par cicadelles du genre <i>Circulifer</i>	<i>Cartovirus</i>
Virus transmis par cicadelles du genre <i>Oriolus</i>	<i>Mastrevirus</i>
Virus transmis par membracidés	<i>Topocuvirus</i>
Particules parasphériques exceptionnellement bacilliformes	
Virus transmis par pollen et graines	<i>Ilarvirus</i>
Particules parasphériques et bacilliformes	
Virus transmis par pucerons	<i>Alfamovirus</i>
Particules à symétrie hélicoïdale, allongées	
46-114 et 180-215 nm × 20-23 nm, transmis par nématodes	<i>Tobravirus</i>
150 et 300 nm × 20 nm, transmis par champignons	<i>Pomovirus</i>
300 nm × 18 nm, transmis par contact entre feuilles	<i>Tobamovirus</i>
340 nm × 18 nm, transmis par champignons du sol	<i>Varicosavirus</i>
470-580 nm × 13 nm, transmis par contact entre feuilles	<i>Potexvirus</i>
600-800 nm × 12-15 nm	
Virus transmis par pucerons ou par aleurodes	<i>Carlavirus</i>
Virus transmis par graines et par un autre vecteur inconnu	<i>Trichovirus</i>
650-900 nm × 12 nm, transmis par pucerons	<i>Potyvirus</i>
650 et 900 nm × 12 nm, transmis par aleurodes	<i>Crinivirus</i>
Virus enveloppés	
Particules parasphériques 50 nm, transmis par pucerons	<i>Umbravirus</i>
Particules parasphériques 80-100 nm, transmis par thrips	<i>Tospovirus</i>
Particules bacilliformes, transmis par cicadelles et pucerons	<i>Nucleorhabdovirus</i>

Le taxon du niveau de la famille défini par un nombre limité de caractères nécessaires et suffisants, regroupe les genres phylogénétiquement proches du point de vue de la structure du génome et de la stratégie de répllication. La dénomination des familles est formée d'un mot composé à partir du nom d'un genre auquel on rajoute le suffixe

« *viridae* » La classification actuelle des phytovirus comprend 14 familles dont 13 concernent les Solanacées (Tableau 2).

Tableau 7: Classification et description des 13 familles de virus des Solanacées en fonction de la nature et de la stratégie génomiques, et de la morphologie des virions (Marchoux, Gognalons, & Sélassié, 2008).

Caractéristiques génomiques	Famille Genre	Caractéristiques de la famille
Génome ADN monocaténaire		
Génome mono- ou bipartite circulaire, particules géminées		
	Geminiviridae <i>Begomovirus</i> <i>Curtovirus</i> <i>Mastrevirus</i> <i>Topocivirus</i>	Les particules virales sont formées de 2 icosaèdres géminés, et le génome viral est constitué d'une ou deux molécules d'ADNmc circulaire ayant une structure en épingle à cheveux qui est à l'origine de la transcription bidirectionnelle. La réplication est nucléaire et réalisée par un mécanisme de cercles roulants sur une forme répllicative bicaténaire (Abdallah et al., 1996). Les quatre genres composant cette famille, qui a une grande importance pour les Solanacées, comportent plus de 50 espèces virales.
Génome ADN bicaténaire avec transcriptase inverse		
Génome monopartite circulaire, particules isométriques		
	Caulimoviridae <i>Caulimovirus</i> <i>Petuvirus</i>	Les propriétés de cette famille sont partagées avec des virus animaux appartenant au « supergroupe » des <i>Pararetrovirus</i> . Le genre <i>Petuvirus</i> a la particularité, exceptionnelle chez les phytovirus, de s'intégrer dans le génome des plantes. Seules 2 espèces infectent les Solanacées.
Génome ARN bicaténaire		
Génome bipartite, particules isométriques		
	Partitiviridae <i>Alphacryptovirus</i>	Cette famille comporte 4 genres, 2 infectant les champignons et 2 les plantes, dont seules 2 espèces du genre <i>Alphacryptovirus</i> concernent les Solanacées. Les caractéristiques principales de cette famille sont un génome composé de deux segments d'ARNbc et la présence d'un ARN polymérase dans les particules icosaédriques de 30-40 nm.
Génome multipartite, particules isométriques		
	Reoviridae <i>Phytoreovirus</i> Genre isolé <i>Varicosavirus</i>	Comme chez les Partitiviridae, les particules virales des Reoviridae sont icosaédriques et le génome est constitué d'ARNbc. Les particules virales mesurent de 60 à 70 nm et le nombre de segments d'ARN varie entre 10 et 12. Les <i>Phytoreovirus</i> sont confinés au phloème dont ils induisent la prolifération, provoquant des tumeurs. Cette famille, plus importante chez les animaux, comprend 9 genres dont 3 phytopathogènes : <i>Fijivirus</i> , <i>Oryzavirus</i> et <i>Phytoreovirus</i> . Seul ce dernier infecte les Solanacées (1 espèce virale).
Génome ARN monocaténaire négatif ou ambisens		
Génome tripartite, grosses particules parasphériques enveloppées		
	Bunyaviridae <i>Tospovirus</i>	Cette famille comporte surtout des virus animaux, transmis par des Arthropodes, mais aussi le genre <i>Tospovirus</i> infectant les végétaux. Importants chez les Solanacées (5 espèces virales), les <i>Tospovirus</i> se multiplient également dans les cellules des thrips vecteurs. La caractéristique principale de la famille est son génome divisé à ARN négatif, ou « ambisens », protégé dans les nucléoprotéines, elles-mêmes enveloppées.
Génome monopartite, particules enveloppées en obus ou bacilliformes		
	Rhabdoviridae <i>Nucleorhabdovirus</i>	Comme pour les Bunyaviridae, les particules des Rhabdoviridae sont enveloppées et contiennent un ARNmc négatif. Leur multiplication est possible à la fois dans les cellules végétales et dans les cellules de l'insecte vecteur. Les Rhabdoviridae se caractérisent en plus par des particules bacilliformes et par une molécule d'ARN de polarité négative avec des extrémités inversées complémentaires. Le génome est transcrit en 6 ARNm par la transcriptase présente dans le virion. Cette famille comporte 3 genres de virus infectant les vertébrés et 2 genres infectant les plantes, <i>Cytorhabdovirus</i> et <i>Nucleorhabdovirus</i> . Seules 5 espèces appartenant à ce dernier genre ont été isolées sur des Solanacées dans la nature.

Nature et constitution des virus

Les virus sont des nucléoprotéines cristallisables qui se multiplient obligatoirement à l'intérieur de la cellule vivante qu'elles parasitent en utilisant à leur profit la machinerie cellulaire. Ils se trouvent donc à la limite entre la matière vivante et la matière inerte. Les virus se différencient des microorganismes tels que Bactéries, Rickettsies et mycoplasmes par trois caractères essentiels :

Ils contiennent soit du DNA, soit du RNA, jamais les deux à la fois.

Les protéines du virus sont synthétisées sur les ribosomes de l'hôte

Les virus se multiplient par synthèse indépendante de leurs constituants, acide nucléique et protéines, puis ensuite, leur liaison, plutôt que par croissance et division.

Ils se présentent sous forme de particules sphériques (15 à 40nm), de filaments ou de bâtonnets (jusqu'à 700nm de long) et sont constitués d'acide nucléique (ARN en général pour les phytovirus, quelque fois ADN) enfermé dans une enveloppe protectrice de nature protéique = capsid. La capsid est constituée de sous unités protéiques toutes semblables pour un virus donné, liées entre elles et formant une architecture caractéristique (ex : symétrie hélicoïdale pour le virus de la mosaïque du tabac (VMT).

La capsid est formée de sous-unités capsidiales identiques dont le nombre fixe est caractéristique d'un virus donné ; chacune d'elles comprend de 150 à plus de 600 acides aminés, de sorte que leur poids moléculaire peut varier de 20 à 40 x 10⁶ kilodaltons (Kd). La séquence de ces acides aminés représente la structure primaire de la sous-unité ; pour un certain nombre de virus, cette séquence est maintenant entièrement connue.

Les acides nucléiques sont de deux types, ribonucléique (ARN) ou désoxyribonucléique (ADN), de forme linéaire ou circulaire, à un seul brin (monocaténaire) ou à deux brins complémentaires (bicaténaires). Ils se répartissent en un seul ou plusieurs segments dans une ou plusieurs particules (virions). Ces acides nucléiques sont constitués par une chaîne (de longueur variable) de nucléotides, composés chacun d'une molécule d'acide phosphorique, d'un sucre (ribose pour l'ARN, désoxyribose pour l'ADN) et d'une base azotée purique ou pyrimidique (fig. 1.1). La grande majorité des phytovirus possèdent un ARN monocaténaire orienté dans le sens 5' - 3' et

directement accessible aux ribosomes de la cellule pour la synthèse des protéines ; cet ARN est dit de polarité positive (ARN(+)).

La forme et les dimensions des particules sont très variables : particules isométriques (icosaédriques) de 18 à 70 nm de diamètre, particules en bâtonnets rigides jusqu'à 300 nm de long, particules flexueuses jusqu'à 1200 nm, particules bacilliformes de 160-380 nm de long sur 60-95 nm de large. Les virus peuvent être nus ou posséder une enveloppe de nature lipoprotéique (Figure 1) (Albouy & Devergne, 1998).

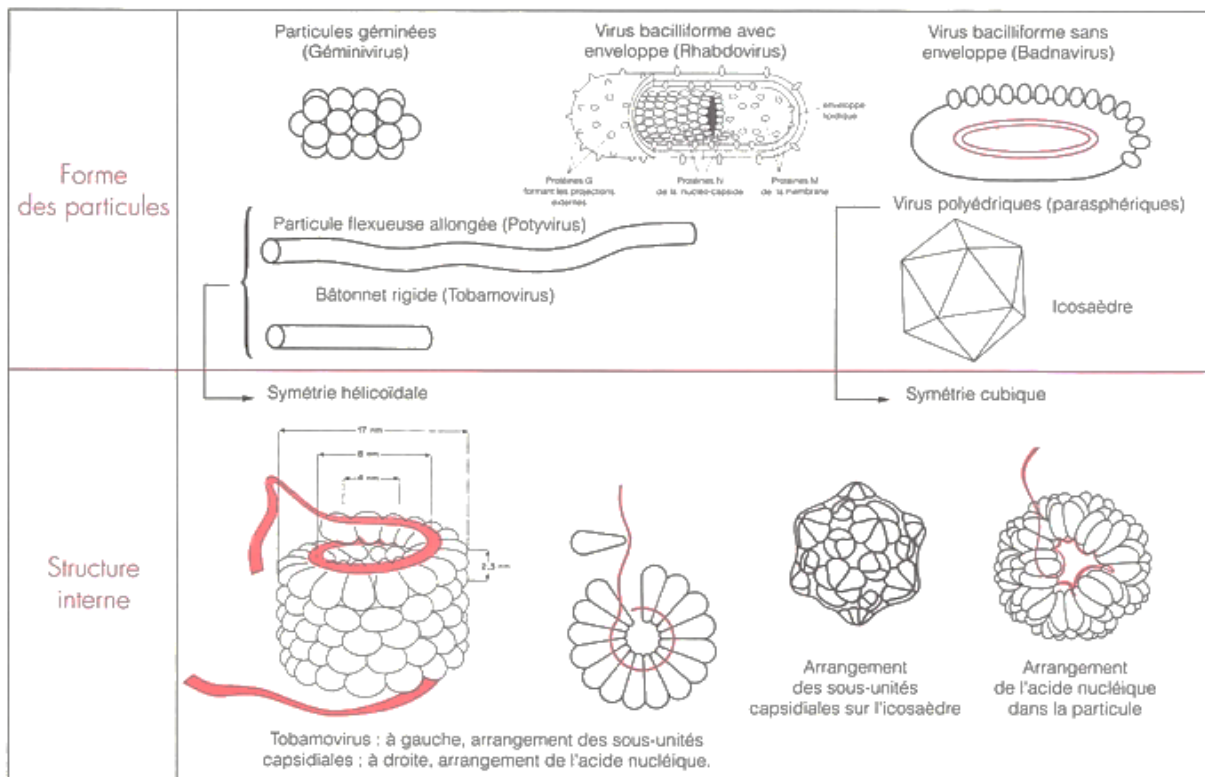


Figure 33: Forme et architecture de quelques genres de phytovirus.
(Albouy & Devergne, 1998)

Transmission et pénétration

Les virus (qui sont tous non mobiles) sont transportés passivement d'une plante à l'autre. Ils ne peuvent pénétrer par leurs propres moyens ; ils ont besoin d'un vecteur qui les introduise dans les tissus de l'hôte. L'homme est le principal responsable de la dissémination des virus par l'introduction et les échanges de matériel infecté ; il favorise également leur dissémination par les blessures accidentelles, les plaies de taille, etc....

La transmission des virus a lieu par différents moyens :

- *transmission mécanique (rare dans les conditions naturelles)*
 - ✓ *par l'intermédiaire de blessures*
 - ✓ *par contact (frottement d'organes végétaux les uns contre les autres) par greffe*
 - ✓ *par Cuscuta (plante parasite)*
 - ✓ *par les instruments aratoires (greffe, taille,...)*
- *transmission par graines (rare) ou, très fréquemment, par les organes de propagation végétative (bulbes, tubercules, rhizomes, boutures)*
- *transmission par vecteurs: les vecteurs sont les suivants:*
 - ✓ *Insectes: Pucerons 60% ; Citadelle 12% ; Aleurodes 10% ; Cochenilles 1% Acariens 5%*
 - ✓ *Nématodes 5%*
 - ✓ *Champignons 3%*

Il existe deux modes essentiels de transmission des virus par les insectes : le mode non persistant et le mode persistant. Dans le mode non persistant (virus de stylet), les virus sont présents dans les cellules épidermiques des végétaux attaqués. A l'occasion d'un repas, l'insecte vecteur prélève des particules virales au niveau du stylet et peut immédiatement les transmettre s'il poursuit son repas sur une plante saine. Il n'y a pas de période de latence et l'insecte n'est pollué que pendant une courte période. Dans le mode persistant (virus circulant), les virus sont présents dans le phloème des plantes. L'insecte absorbe le virus lors d'un repas ; le virus est transporté dans l'appareil digestif, parfois se multiplie et finit par atteindre les glandes salivaires. L'insecte est alors infectant car lorsqu'il va se nourrir sur une plante saine, il injecte au moment de la piqûre un peu de salive qui contient des particules virales. Il y a une période de latence entre l'acquisition du virus par le vecteur et l'instant où celui-ci devient infectieux ; mais l'acquisition est définitive (héréditaire dans le cas de certaines Cicadelles).

Le processus d'infection virale

La pénétration du virus dans la plante est le premier événement indispensable pour que s'enclenche le processus infectieux. Contrairement, par exemple, aux champignons qui disposent pour cela de spores, les virus ne possèdent pas de structures propres adaptées à leur dissémination leur permettant de pénétrer seuls dans la cellule-hôte. Pour surmonter les deux barrières physiques que sont la cuticule à la surface du limbe foliaire puis la paroi pecto-cellulosique rigide qui entoure la cellule végétale, la particule virale ne peut entrer en contact avec le cytoplasme cellulaire qu'après abrasement de cette cuticule

par frottement naturel ou provoqué (lors d'une infection mécanique expérimentale). Les vecteurs biologiques comme les insectes ou les nématodes accomplissent également avec efficacité cette entrée du virus dans les cellules de l'épiderme foliaire ou racinaire, ou dans les tissus du phloème. Si la plante est sensible au virus, celui-ci se multiplie aussitôt dans les premières cellules infectées.

Au niveau cellulaire (cas général des virus à ARN simple brin)

— dès que la particule virale a pénétré dans la cellule de l'hôte, son acide nucléique (ARN) est libéré (décapsidation) (fig. 1.5) ;

— aussitôt, le processus de réplication de l'ARN génomique viral entre en jeu. Les ribosomes de la cellule-hôte viennent se positionner sur cet ARN et la traduction du message génétique en protéines s'engage. Parmi les protéines synthétisées figurent des protéines virales structurales (capsidiales) et non structurales (réplicases, protéines de diffusion) ;

— l'ARN viral (brin+) va servir de modèle à la réplicase pour la production de molécules complémentaires d'ARN (brin-) qui seront à leur tour utilisées pour la synthèse de nombreuses molécules d'ARN(+) (encadré ci-dessous)

— alors que la synthèse des protéines virales a lieu dans le cytoplasme cellulaire, les particules virales (virions) se structurent et s'accumulent dans des sites spécifiques (corps)

Traduction et réplication du génome viral

On sait que dans la cellule, l'ADN est dépositaire de l'information génétique. Pour passer de l'information portée par l'ADN à la synthèse de la protéine, il faut une molécule messagère : c'est l'ARN messager (ou ARN-m) qui assure la transcription du gène et sa traduction en protéine.

De nombreux phytovirus ont un ARN comme support de leur information génétique. Lors de l'infection, cette molécule d'ARN va assurer deux fonctions selon des modalités originales par rapport au système cellulaire normal : une fonction messagère de traduction conduisant à la synthèse de nouvelles protéines virales et une fonction de modèle pour la synthèse de nouvelles molécules d'acide nucléique.

Le rôle de la réplication de l'ARN (brin +) dans le processus d'infection est primordial. Cette réplication est toujours associée aux systèmes membranaires de la cellule tels que le réticulum endoplasmique, les chloroplastes ou les mitochondries. C'est une enzyme ARN polymérase ARN-dépendante (*RpRd*) appelée réplisase qui polymérise dans le sens 3'—5' les nouvelles molécules d'ARN viral en copiant le modèle à partir de l'extrémité 3'. Les réplisases sont spécifiques des virus qu'elles multiplient ; elles reconnaissent les séquences de l'extrémité 3' de l'ARN qui sont ainsi directement impliquées dans l'initiation de la réplication.

D'une façon générale, le brin (+) sert de modèle pour la synthèse du brin (-) et réciproquement. A partir de l'ARN génomique (brin +) il y a d'abord synthèse d'un brin (-), puis il apparaît des structures branchées appelées intermédiaires de réplication (IR) constituées d'un brin (-) sur lequel plusieurs brins (+) sont en voie de croissance ; ainsi le nombre de brins fils (+) dans la cellule devient largement supérieur à celui des brins (-). Les formes dites réplisatives (FR) en double-brin se forment en cours de synthèse. Chez les phytovirus, deux genres, les *Caulimovirus* et les *Badnavirus*, possèdent un génome à ADN double brin. Ces virus ont en commun avec des virus animaux comme celui de l'hépatite B (Hepadnavirus) de comporter dans leur cycle réplisatif une étape de transcription inverse qui réalise le passage de l'ADN en ARN simple brin. Cette rétrotranscription est assurée par une enzyme, la transcriptase-inverse, qui est portée par le virus.

Au niveau tissulaire

— à partir de ce centre primaire d'infection, le virus se répand plus ou moins rapidement dans les cellules voisines du tissu parenchymateux où s'amorcent d'autres cycles d'infection. Le passage de cellules à cellule se fait au niveau des ponts cytoplasmiques que sont les plasmodesmes ; il est gouverné par une protéine virale dite protéine de diffusion ;

— généralement, le virus, ayant atteint les tissus vasculaires, envahit toute la plante ; l'infection est alors dite systémique et conduit à une maladie virale généralisée et permanente. Mais, quelquefois, la progression du virus est limitée dans l'espace et dans le temps. Le virus reste alors localisé dans et au voisinage des cellules initialement infectées

par la mise en place de mécanismes de défense de la plante. L'infection se traduit alors uniquement par l'apparition précoce de lésions locales, puis elle s'arrête (photo 1.1). Ce type de réaction d'hypersensibilité est souvent utilisé pour le diagnostic sur hôtes différentiels

Multiplication dans la plante

Une fois dans la cellule, le virus dévie le métabolisme de cette dernière à son profit pour pouvoir se multiplier. Le virus est alors décapsidé (séparation acide nucléique-capside) et l'information génétique portée par son acide nucléique s'exprime.

Chez les phytovirus à ARN, les plus courants, l'acide nucléique est traduit par la cellule, comme un ARN messager. Des protéines spécifiques du virus sont ainsi synthétisées : sous-unités protéiques et sous-unité réplicase (fonction messagère de l'ARN). La sous-unité réplicase vraisemblablement associée à d'autres unités d'origine cellulaire, forme une réplique à celui du virus.

D'autres virus apportent une enzyme, mais ils ont toujours besoin de la machinerie de la cellule hôte pour se multiplier. Il y a assemblage des sous-unités protéiques constituant la capsid autour de l'acide nucléique et formation de particules virales identiques à celles qui ont été introduites.

Symptômes

Les symptômes des maladies virales observés le plus fréquemment sont les suivants :

- ✓ Lésions nécrotiques locales
- ✓ Diminutions faibles ou importantes du taux de croissance et/ou du rendement
- ✓ Mosaïques, éclaircissement des nervures, jaunissement et décoloration
- ✓ Variations de couleur et de forme des fleurs et des fruits)
- ✓ Variation (en plus ou en moins) de la longueur des entrenœuds avec parfois formation de balais de sorcière.

Les plantes atteintes peuvent cependant ne montrer aucun symptôme évident tout en restant porteuses d'un virus en plein développement (infection latente)

L'identification des maladies à virus peut être basée sur ces symptômes. Cependant, des symptômes semblables peuvent être provoqués par des virus différents ou même par des carences ou des désordres génétiques.

Conservation

La conservation des virus est assurée par différents moyens.

- *Semences infectées*
- *Virus susceptibles d'infecter différentes espèces cultivées dont les périodes de culture se chevauchent, ou diverses espèces spontanées (rôle des plantes adventices comme réservoir de virus)*
- *Graines de plantes spontanées*
- *Formes de résistance de Nématodes ou de Champignons vecteurs de virus, œufs de Cicadelles.*
- *Matériel de culture pollué.*

Détection et identification

Il est nécessaire de savoir détecter les viroses et, souvent, de pouvoir les identifier de façon précise pour la mise en œuvre de techniques de lutte efficaces. Parmi les possibilités offertes :

- *Étude des symptômes : malheureusement, les symptômes ne sont pas toujours spécifiques ou suffisamment marqués.*
- *Microscopie électronique permettant de détecter la présence de particules virales chez les plantes malades et pouvant aider l'identification du virus en précisant la forme et la dimension des particules.*
- *Étude des propriétés infectieuses par transmission à des plantes indicatrices (indexage) qui réagissent de façon spécifique.*
- *Utilisation des propriétés immunologiques des particules virales en faisant appel à la réaction antigène-anticorps. Une préparation de virus purifié (antigène), injectée à un lapin, provoque chez ce dernier la formation d'anticorps. On recueille le sang de l'animal ainsi immunisé et l'on extrait le sérum. En mélangeant celui-ci avec un jus de plante malade, on obtient un précipité, si le virus est présent. La méthode est spécifique mais d'un emploi délicat.*

Moyens de lutte

La lutte contre les maladies à virus est difficile ; seules des mesures prophylactiques (prévention) sévères sont envisageables. On ne connaît pas actuellement de substances chimiques permettant de guérir au champ des plantes virosées.

- *Prévention des contaminations*

- *Lutte contre les vecteurs*
- *Épuration et destruction des sources de virus*
- *Régénération de clones infectés de façon chronique. Deux méthodes sont utilisées :*
 - ✓ La thermothérapie ou traitement par la
 - ✓ La culture de méristème
- *Sélection sanitaire et certification*
- *Création de variétés résistantes.*

Les phytovirus

Chez les plantes, les maladies provoquées par des virus ont des caractéristiques propres qui les distinguent de celles occasionnées par d'autres agents pathogènes comme, par exemple, les champignons ou les bactéries : ce sont des maladies généralisées, persistantes et incurables.

Les maladies à virus sont généralisées dans la mesure où le virus envahit presque toutes les parties du végétal ; c'est pourquoi les plantes multipliées par voie végétative comme le sont beaucoup d'espèces ornementales sont les plus touchées par ce genre d'infection. C'est surtout par l'intermédiaire de boutures, de bulbes ou de rhizomes contaminés que le virus se transmet à la descendance alors que les cas de transmission par la graine sont comparativement beaucoup plus rares. Cela n'exclut pas que le virus soit parfois réparti de façon très hétérogène dans la plante malade ou éventuellement localisé préférentiellement à certains tissus. De nombreux virus, comme par exemple les virus à mosaïque sont localisés dans le parenchyme foliaire alors que d'autres, comme les Lutéovirus, sont inféodés au liber. D'autre part, au voisinage des tissus méristématiques, il existe généralement un gradient décroissant de la concentration en virus entre les ébauches foliaires et la calotte apicale, de sorte que le méristème se trouve être le plus souvent indemne de virus.

Les maladies à virus sont persistantes et incurables. Une fois infectée, la plante le demeure pour toujours ; en effet, à la différence de l'homme et de beaucoup d'espèces animales, elle ne dispose pas elle-même de mécanismes de défense de type immunitaire capables d'éliminer l'agent infectieux et d'entraîner sa guérison. De plus, il n'existe pas pour le moment de procédés de lutte chimique directe contre les infections virales comme

cela est notamment le cas pour les infections cryptogamiques ; en effet, les substances actives qui seraient capables d'interférer spécifiquement avec le cycle de multiplication virale sont également phytotoxiques. Par conséquent, les méthodes de lutte pratiquées encore aujourd'hui contre les viroses des végétaux cultivés sont-elles essentiellement des mesures d'ordre prophylactique.

Cette généralisation et cette persistance des infections virales, jointes aux difficultés de lutte, expliquent l'importance prise par ces maladies en phytopathologie. Quant aux dommages qu'elles provoquent en horticulture, bien que les viroses ne se traduisent pas toujours par des symptômes spectaculaires sur la plante infectée, elles affectent toujours la vigueur du végétal et sont souvent la cause de fortes baisses de rendement. A cela s'ajoute un effet dépressif sur la qualité de la production qui est particulièrement préjudiciable dans le cas d'espèces ornementales.

Plus de 1 000 virus de plantes (ou phytovirus) sont actuellement connus. Rassurons-nous tout de suite : si certains de ces virus peuvent se multiplier chez les insectes, aucun n'est capable d'infecter l'homme ou les animaux supérieurs.

Toutefois, ces virus constituent une menace indirecte, les épidémies touchant les plantes pouvant être à l'origine de pertes importantes dans les cultures horticoles (par exemple le virus de la maladie bronzée de la tomate, Tomato spotted wilt, TSWV, ou le Tomato yellow leaf curl, TYLCV) et en grandes cultures (par exemple la jaunisse nanisante de l'orge, Barley yellow dwarf virus, BYDV).

Les symptômes provoqués par les phytovirus varient en fonction du virus, de la plante et de son état physiologique, ainsi que de son environnement.

Les manifestations les plus courantes sont l'apparition d'une coloration irrégulière (symptôme de mosaïque) pouvant être associée à des cloques et autres déformations, d'un jaunissement des feuilles, voire de nécroses (dégradation des tissus) des feuilles, tiges, fleurs ou fruits. Une plante infectée reste malade toute sa vie et le virus se multiplie dans tous ses organes (racines, tiges, feuilles, fleurs, tubercules...). On comprend donc l'impact de ces viroses sur la qualité des récoltes.

Mais quels sont donc les moyens de dissémination de ces virus et les stratégies permettant de lutter contre ces infections ? Deux modes de transmission sont possibles :

La transmission horizontale, qui correspond au passage d'un virus d'une plante à une autre (par exemple le Cucumber mosaic virus, CMV). Ce mode de transmission fait intervenir des intermédiaires appelés vecteurs. Dans ce cas, la transmission de virus entre plantes peut avoir lieu à plusieurs mètres, voire plusieurs kilomètres de distance.

La transmission verticale, qui correspond au passage de virus entre générations d'une même plante. Tous les virus se transmettent via les organes de multiplication des plantes (boutures, greffons, tubercules, bulbes), certains sont transmis par les graines (semences, cas du virus de la mosaïque de la laitue, LMV) ou plus rarement par le pollen (par exemple Prunus necrotic ringspot virus, PNRSV, chez l'abricotier ou le rosier) (Biacchesi, Chevalier, Galloux, Langevin, Le Goffic , & Brémont, 2017).

Viroses transmises par les pucerons

Les pucerons sont parmi les plus fréquents et les plus efficaces vecteurs des viroses. Pour que les viroses se propagent dans une culture céréalière, il faut qu'elle soit infestée de pucerons virulifères. Normalement, les pucerons proviennent des cultures voisines ou de graminées spontanées. Les premières attaques dans un champ se manifestent chez des plantes éparses ou dans des petits foyers, ordinairement en bordure du champ. Sous certaines conditions, la population de pucerons augmente à un tel point qu'il se produit une migration éolienne extensive susceptible d'entraîner l'infestation généralisée de grandes étendues. La chlorose généralisée et le nanisme sont considérés comme étant les symptômes typiques des viroses des céréales transmises par les pucerons. Mais au cours des dernières années, certaines viroses des céréales qui déterminent des mosaïques et des rayures ont été signalées.

Jaunisse nanisante de l'orge (barley yellow dwarf virus)

Cette maladie est une des viroses les plus largement répandues chez les céréales et susceptible de causer des pertes économiques importantes. Le blé, l'orge, l'avoine, le seigle, le triticale et les graminées sont des hôtes du virus de la jaunisse nanisante de l'orge (**VJNO**). Les symptômes sur l'orge, le blé et l'avoine sont souvent spectaculaires ; les feuilles virent au jaune (sur blé et orge) ou au rouge vif (sur avoine) commençant par la pointe et progressant vers la base, la plante présente un rabougrissement, un tallage excessif, une production d'épis blancs stériles, et on note la présence de pucerons. Tous ces symptômes sont diagnostiques. Plusieurs espèces de pucerons sont vecteurs du VJNO, les plus communs sont les *Rhopalosiphum*, *Metopolophium* et *Macrosiphum*. *Schizaphis graminis*, le puceron vert des graminées, est capable de transmettre ce virus (quoique moins efficacement que les autres pucerons) et peut aussi provoquer des taches et des bigarrures par les toxines qu'il injecte dans la plante pendant qu'il se nourrit. Un grand nombre de travaux de recherche ont été réalisés en vue de créer des variétés résistantes au virus de la jaunisse nanisante de l'orge.

Rayure virale Free State

Cette virose transmise par pucerons se rencontre au Mexique et en Afrique du Sud. Elle se manifeste sur le blé, l'orge, le seigle, le triticale et sur quelques espèces de brome,

mais rarement sur l'avoine. Une à trois rayures vert pâle apparaissent sur les feuilles atteintes. Les feuilles des étages supérieurs s'enroulent en long, et ainsi prennent l'aspect d'une feuille d'oignon. Parfois, chez le blé et le triticale, il se développe une pigmentation rougeâtre ou pourpre dans les rayures. Les épis sont ordinairement charnus, et déformés, et ne forment pas de grains viables. Les pucerons vecteurs, connus sous le nom de *Diuraphis noxia* en Afrique et *D. mexicana* au Mexique, se cachent dans le creux de la feuille enroulée. Les jeunes pieds d'orge infestés se rétablissent parfois si on enlève ou tue les pucerons.

Autres viroses transmises par les pucerons

Plusieurs autres viroses transmises par les pucerons existent en Asie Centrale et de l'Est. La jaunisse de la feuille du blé (wheat yellow leaf) se rencontre sur le blé et l'orge au Japon. Les symptômes ressemblent à ceux de la jaunisse nanisante de l'orge. Le puceron du maïs, *Rhopalosiphum maidis*, en est le vecteur. La mosaïque de l'orge et la mosaïque bigarrée du cardamome (cardamon streak mosaic) sont des viroses fréquentes en Inde. *Rhopalosiphum maidis* et d'autres espèces de pucerons en sont les vecteurs. Le blé, l'avoine, l'orge et quelques graminées sont sensibles à ces viroses.

Viroses transmises par les cicadelles

Les cicadelles sont les insectes vecteurs de plusieurs virus et d'un mycoplasme qui attaquent les céréales. Plus d'une striure virale du blé manifestent des symptômes presque identiques, ce qui rend très difficile l'identification de ces maladies sur la base des symptômes. Les symptômes précoces sont des rayures étroites, discontinues, le long des nervures des feuilles. Ensuite, apparaissent des taches nécrotiques. Les plantes atteintes sont parfois rabougries et les épis souvent stériles. Les hôtes de la plupart de ces virus sont le blé, l'avoine, l'orge, le seigle et diverses graminées.

Les cultures hivernales subissent fréquemment plus de dégâts que les printanières, mais en retardant de quelques semaines l'ensemencement à l'automne, on réduit généralement l'infestation de cicadelles. L'emploi de variétés tolérantes aide à diminuer les pertes.

Striure virale américaine du blé

Cette maladie se rencontre dans le centre et le nord des USA et au Canada. Les cicadelles vectrices sont *Endria inimica* et *Elymana virescens*. Le blé d'hiver est la plante la plus fréquemment atteinte. D'autres céréales sont sensibles à cette virose.

Viroses transmises par les fulgoridés

Les viroses transmises par les fulgoridés (planthoppers) se rencontrent sur le blé, l'orge, le triticale, l'avoine, le seigle et diverses graminées. Les symptômes maladiques sont similaires à ceux des autres viroses : rayures blanchâtres ou jaunes sur les feuilles, nanisme, tallage excessif et stérilité. Les viroses à transmission par les fulgoridés sont répandues surtout en Europe et en Asie Orientale. Les vecteurs les plus efficaces semblent être certaines espèces des *Laadelphax* et de *Javesella*.

Hoja blanca du riz

Hoja blanca, ou feuille blanche, est principalement une virose du riz, mais elle est capable d'affecter toutes les céréales à paille. Son aire de distribution est déterminée par celle de ses vecteurs, certaines espèces de *Sogatodes* présentes dans les cultures de riz. Le symptôme caractéristique, les feuilles blanches, est surtout prononcé sur les étages foliaires supérieurs et les épis. Les feuilles du bas présentent des marbrures et des stries. La maladie existe dans les régions rizicoles du sud des USA, des Caraïbes, de l'Amérique Centrale et l'Amérique du Sud.

Bigarrure virale africaine des céréales

Cette maladie est fréquente sur le blé au Kenya et en Ethiopie. Elle est susceptible de se manifester sur toutes les céréales à paille et les graminées locales. Les plantes atteintes ordinairement sont éparpillées ou par petits foyers dans le champ, et sont plus nombreuses dans les cultures de saison sèche. Le virus est transmis par *Taya catilina*. Les symptômes primaires sont d'étroites rayures sur les feuilles. Les rayures s'élargissent, surtout sur les feuilles du haut, et forment de larges rayures jaune pâle ou une chlorose de toute la feuille. Les pertes sont insignifiantes.

Mosaïque striée européenne du blé

Des épidémies de cette virose se sont produites en Europe de l'Ouest vers la fin des années 60. Cette virose attaque le blé, l'avoine, l'orge, le seigle, le maïs et certaines graminées. Au moins deux espèces de *Javesella* sont des vectrices efficaces. Les attaques au stade plantule sont létales. Les attaques moins précoces déterminent des bandes jaunes pâles sur les feuilles au haut de la tige. La production de grains sur ces plantes est minime et de mauvaise qualité. Les semis tardifs des céréales hivernales raccourcissent le temps d'exposition aux fulgoridés virulifères.

Autres viroses transmises par les fulgoridés

Plusieurs autres viroses des céréales transmises par les fulgoridés, spécialement par certaines espèces de *Laodelphax*, se rencontrent en Europe ; entre autres la mosaïque jaune striée de l'orge (barley yellow striate mosaic), la bigarrure chlorotique du blé (wheat chlorotic streak) et le tallage excessif des céréales (cereal tillering). Le nanisme stérilisant de l'avoine (oat sterile dwarf), présent aussi en Europe, est transmis par le fulgoridé, *Javesella pellucida* et *Dicranotropis hamata*. La plupart des céréales sont sensibles à ces viroses.

Viroses transmises par les acariens

Au moins trois viroses transmises par les acariens existent en Amérique du Nord et en d'autres régions céréalières du monde. Deux espèces d'acariens, *Aceria tulipae* et *Abacarus hystrix* sont des vecteurs communs de ces viroses. Ces viroses sont plus graves sur le blé que sur l'orge et le seigle.

Mosaïque striée du blé

C'est une maladie sérieuse du blé d'hiver dans les régions du centre des USA. La maladie est largement répandue en Amérique du Nord, en Europe et du Proche Orient. Le phytopte de la tulipe, *Aceria tulipae*, est le vecteur commun. Les sujets atteints manifestent des rayures bigarrées et chlorotiques, ainsi qu'un rabougrissement, surtout prononcé s'ils ont été contaminés au stade plantule.

Mosaïque de l'agropyron et mosaïque du ray-grass

Ces deux viroses sont transmises par l'acarien, *Abacarus hystrix*. Les principales plantes hôtes de ce virus sont diverses graminées, mais les céréales sont occasionnellement attaquées. Une marbrure vert jaunâtre et des stries chlorotiques étroites apparaissent sur les feuilles des plantes de blé et d'orge atteintes. L'avoine est sensible à la mosaïque du ray-grass, mais non à la mosaïque de l'agropyron.

Mosaïque tachetée du blé

La mosaïque tachetée du blé est transmise aussi par le phytopte *A. tulipae*. Les symptômes sont des taches jau ne pâle, distinctes, qui s'accroissent graduellement et forment des macules nécrotiques à partir de l'extrémité de la feuille. L'agent pathogène qui provoque la mosaïque tachetée du blé n'a pas encore été identifié. Cette virose parfois accompagne la mosaïque striée du blé dans certaines régions. La mosaïque tachetée du blé ne cause pas de pertes économiques importantes.

Viroses transmises par le sol

Les viroses transmises par le sol (telluriques) sont répandues dans toutes les régions du monde. Celles qui attaquent les céréales en Amérique du Nord sont transmises principalement par un champignon primitif qui habite le sol, *Polymyxa graminis*. Les nématodes et certains autres organismes du sol sont vecteurs de ces virus. Le blé, l'orge et le seigle sont les hôtes communs des virus transmis par le sol ; quant à l'avoine soit elle est résistante, soit elle n'extériorise pas de symptômes une fois infectée. Il semble que ces viroses apparaissent chaque année aux mêmes endroits. Leur extension est généralement lente.

Le champignon vecteur est un habitant du sol difficile à maîtriser. La fumigation du sol est efficace, mais n'est pas 'économique pour les cultures céréalières.

Mosaïque du blé transmise par le sol (wheat soil-borne mosaic virus. WSBMV)

Cette maladie occasionne des dégâts graves au blé d'hiver en Amérique du Nord. L'orge et le seigle peuvent aussi être affectés. Le virus est transmis par le champignon *Polymyxa graminis*. Il semble que c'est dans les sols détrempés que la maladie sévit le plus souvent. Les plantes virosées sont rabougries et les feuilles présentent des rayures ou

divers motifs chlorotiques. Les infections précoces occasionnent chez les variétés sensibles la croissance en rosette sans formation d'épis. Il existe des variétés de blé d'hiver résistantes.

Filosité-bigarrure du blé

Cette virose est transmise aussi par le champignon *P. graminis*. Elle existe dans la région des Grands-Lacs, et d'autres régions des Etats : Unis et du Canada. Les symptômes les plus nets se manifestent durant les périodes froides. Ils tendent à disparaître par temps chaud.

Viroses transmises par la semence

La mosaïque striée de l'orge est une des rares viroses des céréales qui sont transmises par la semence. La maladie attaque surtout l'orge, mais le blé, l'avoine, le maïs et plusieurs graminées peuvent aussi être atteintes. La maladie est ubiquiste. Le virus est susceptible d'être transmis mécaniquement dans le champ par le frottement des plantes infectées sur les voisines qui sont saines, et par le pollen.

Les symptômes des viroses transmises par la semence ont tendance à apparaître tôt dans la saison. Sur l'orge, le virus provoque des rayures ou des bandes chlorotiques sur les feuilles. Les variétés les plus sensibles sont fortement rabougries et tallent excessivement. Les bandes ressemblent aux symptômes initiaux de la strie foliaire causée par *Helminthosporium gramineum*.

Les symptômes sur le blé sont généralement moins marqués que ceux sur l'orge, bien que les variétés les plus sensibles manifestent des symptômes typiques de mosaïque. L'emploi de semence saine et l'éradication des pieds d'orge spontanés suffisent à maîtriser cette maladie.

Mosaïque de l'orge

La mosaïque de l'orge, une maladie peu fréquente signalée en Inde, est ordinairement transmise par le puceron *Rhopalosiphum maidis*, mais est aussi susceptible d'être transmise par la semence et mécaniquement à l'orge, au blé et à l'avoine. La maladie n'a pas été signalée hors de l'Inde. Les plantes infectées sont rabougries et les feuilles développent des symptômes de mosaïque tard dans la saison (Zillinsky & Pelletier, 1983).

1. Les nématodes phytoparasites

Les nématodes sont des **vers microscopiques** normalement cylindriques et allongés ("nema" en grec = cheveux), sans tête bien définie, à symétrie bilatérale et enfermés dans une cuticule assez résistante ornementée ou annelée.

Cette **annélation est tout à fait superficielle** et ne correspond à aucune division interne de l'organisme, contrairement à d'autres vers (annélidés).

La taille des nématodes est très variable : l'ascaris du cheval peut atteindre 30 cm, certaines espèces atteignent le mètre, mais ce n'est pas le cas des espèces de nématodes phytophages, dont le diamètre varie entre 10 et 40 microns et la taille oscille entre 200 microns et 1 cm.

Les tailles et diamètres varient fortement en fonction du stade (larve ou adulte) ou du sexe de l'animal. Ces animaux sont donc petits et difficiles à mettre en évidence sans observations précises (rarement visibles à l'œil nu, ils nécessitent des techniques de mise en évidence particulières).

On peut considérer que **leur corps est constitué de trois tubes emboîtés** l'un dans l'autre : un fourreau externe ou cuticule, un tube digestif et les organes reproducteurs.

Le **premier tube** est un fourreau externe comprenant la cuticule externe, l'épiderme et le système musculaire (4 faisceaux musculaires longitudinaux). On distingue encore à la tête de l'animal, la capsule céphalique où la cuticule est plus épaisse ; la tête est aplatie, plus ou moins tronquée ou un peu allongée. On peut parler chez les nématodes de squelette hydrostatique ; il y a à l'intérieur du corps une haute pression qui maintient le corps en turgescence. La cuticule doit donc être suffisamment épaisse et inélastique pour résister à cette pression interne.

Le **second tube** est constitué essentiellement par le tube digestif ; l'appareil digestif est simple et constitué des organes suivants : bouche, souvent entourée de soies sensorielles ou papilles et organes chimiorécepteurs (les amphides). Après la bouche, vient la cavité buccale avec le stylet plus ou moins long, l'œsophage avec les trois glandes péri-œsophagiennes, le bulbe médian. Enfin vient l'intestin terminé par le rectum et l'anus.

A côté du tube digestif, **le troisième tube** ou cavité générale du corps renferme les gonades (appareil reproducteur). Les femelles ont de 1 à 2 "ovaires" ; le vagin est situé soit à mi-longueur du corps (en position ventrale), soit à la partie terminale du corps (la position de la vulve est un caractère de reconnaissance des genres).

Le système nerveux est rudimentaire ; un anneau nerveux entoure l'œsophage d'où partent les nerfs qui cheminent dans l'épiderme. Il n'y a pas d'appareil circulatoire.

Le cycle évolutif de tous les nématodes phytophages comprend **cinq stades distincts** : quatre stades larvaires terminés par une mue (L1, L2, L3 et L4) et un stade adulte.

C'est entre le stade L4 et le stade adulte qu'apparaissent les organes sexuels (ovaire(s) et spicules). A l'exception des nématodes sédentaires, chez les autres espèces, les larves se distinguent surtout par leurs tailles respectives ; mais, hormis les organes sexuels, elles possèdent tous les autres caractères des nématodes adultes, ce qui permet au spécialiste de les identifier.

2. La systématique des nématodes

Cette classification est récente donc instable et constamment remise en question. Les phytoparasites sont limités à 15 familles contenant 111 genres. Les nématodes forment une classe parmi les Némathelminthes.

La classe des Nématodes est divisée en deux sous-classes :

2.1. La sous-classe des *Phasmidia*

Cette sous-classe contient l'ordre qui nous intéresse : les TYLENCHIDA.

Cet ordre contient des nématodes à évolution plus poussée que celui des RHABDITIDA dont les représentants sont saprophages, bactériophages, mycophages, phytophages.

Exemples :

- Tylenchus*: parasite de champignon
- Anguina*: parasite des organes aériens
- Ditylenchus* : parasites des parties aériennes des plantes et des bulbes.
- Belonolaimus* (ectoparasites migrants de racines)

- *Scutellonema*
- *Helicotylenchus*
- *Rotylenchus*
- *Pratylenchus* (*P. vulnus, penetrans, thornei, neglectus,...*)
- *Radopholus* (*R. similis*)
- *Globodera* (*G. rostochiensis, punctata, pallida*)
- *Heterodera* (*H. schachtii, avenae, carotae...*): femelles formant des kystes
- *Meloidogyne* (*M. arenaria, javanica, hapla, incognita, javanica, etc.*) : femelles formant des galles.

2.2. La sous-classe des *Adenophorea* (= *Aphasmidia*)

Cette sous-classe contient en particulier l'ordre des DORYLAIMIDA dont les représentants n'ont pas de phasmides (organe sensoriel) et sont (les seuls nématodes) **vecteurs de viroses** :

- Longidoridés: *Xiphinema et Longidorus*
- Trichodoridés: *Trichodorus et Paratrichodorus*

Le nématode, guidé par ses amphides (chimiorécepteurs), approche de la racine et perce avec son stylet une cellule de celle-ci. Il y injecte les sécrétions de la glande œsophagienne: celles-ci lysent le contenu (le "digèrent") qui est alors aspiré par le lumen du stylet vers l'intestin au travers du bulbe médian (qui sert de pompe aspirante refoulante). C'est le mode d'alimentation de tous les nématodes migrants.

3. Les nématodes des racines :

il existe des parasites externes qui ne pénètrent jamais à l'intérieur des racines, mais se contentent de les piquer avec leur stylet (ectoparasites migrants ou sédentaires) et des parasites internes qui creusent dans le cortex des racines des cavités en détruisant les cellules et en se nourrissant de leur contenu et qui ont leur cycle en tout ou en partie qui se fait dans les tissus végétaux; ils sont migrants (si tous les stades -larves et adultes- restent en général vermiformes) ou sédentaires (si les femelles se renflent et restent fixées à un endroit où elles se nourrissent) : ce sont les endoparasites sédentaires.

Chez ces nématodes, la pénétration de la plante a lieu pendant les premiers stades de développement (habituellement au deuxième stade larvaire ou J2).

Les larves s'enfoncent dans le parenchyme et s'établissent sur un site nourricier en induisant la formation chez l'hôte de cellules transformées, plus grandes et polynucléées, et qui servent à fournir au nématode les éléments nutritifs nécessaires ("cellules géantes" du syncytium).

Après la dernière mue, la femelle grossit de plus en plus ce qui la rend immobile ; elle se transforme en kyste (**nématodes à kystes**, *Globodera* ou *Heterodera*) ou provoque la formation de galles sur les racines (**nématodes à galles**, *Meloidogyne*). Le kyste peut survivre longtemps dans le sol, même en absence de plantes-hôtes.

D'autre part, même lors de conditions favorables, une fraction des kystes (de 10 à 40%) n'éclosent pas, ce qui maintient un potentiel d'infestation dans le sol.

4. Les nématodes des parties aériennes :

Certaines espèces de nématodes phytophages sont capables de migrer hors du sol et de s'attaquer aux parties aériennes des plantes. Ils se déplacent à la surface des tiges et des feuilles dans la pellicule d'eau qui les recouvre lors d'une pluie ou d'une rosée. Quand cette pellicule d'eau disparaît, ils passent à l'état de vie ralentie (anabiose) et ne reprennent leur activité que quand elle se reconstitue. On peut notamment citer :

- le nématode des tiges et des bulbes (*Ditylenchus dipsaci*)
- les nématodes des feuilles (*Aphelenchoides* spp. et *Anguinatritici*, agent de la "nielle" du blé): *Aphelenchoides besseyi* (sur riz).

Suite aux attaques, généralement on ne voit que des zones où la végétation est moins dense, les plantes plus petites, réparties en taches d'inégale importance. Souvent les plantes infestées flétrissent au soleil car l'absorption d'eau est freinée par l'altération du système racinaire. Au niveau du système racinaire, les dégâts vont des nécroses superficielles, dues aux piqûres de nématodes ectoparasites, à la déformation complète de la racine par production de galles sous l'action des endoparasites (exemple : les divers *Meloidogyne*). L'absorption d'eau est très souvent gênée. L'assimilation du potassium est diminuée, parfois celle du sodium également.

Des interactions entre les nématodes et les organismes pathogènes existent : effets synergiques entre virus et nématodes ; action de *Globoderaros tochiensis* aggravée par la présence de *Rhizoctonia solani* ou *Verticillium dahliae*, etc. Des variétés de tomate

résistantes à *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* devenaient sensibles à l'égard de ce pathogène en présence de *Meloidogyne incognita*. Les Meloidogyne semblent briser la résistance en provoquant chez la plante de profonds changements dans la physiologie :ceux-ci la prédisposeraient aux attaques de *Fusarium*.

Références

- VICENTE, J., & HOLUB, E. (2013). *Xanthomonas campestris*pv.*campestris*(cause of black rot of crucifers) in the genomic era is still a worldwide threat to brassica crops. *Molecular plant pathology* , 14 (1), 2–18.
- Albouy, J., & Devergne, J.-C. (1998). *Maladies à virus des plantes ornementales*. INRA.
- Bailly, R., Robbe-Durand, P., Fougeroux, A., Beyt, N., d'Aguilar, J., Coutin, R., et al. (1990). *Guide pratique de défense des cultures*. Le Carrousel et ACTA.
- Biacchesi, S., Chevalier, C., Galloux, M., Langevin, C., Le Goffic , R., & Brémont, M. (2017). *Les virus ennemis ou alliés?* Éditions Quæ.
- Bouchet, P., Guignard, J.-L., Pouchus, Y.-F., & Villard, J. (2005). *Les champignons Mycologie fondamentale et appliquée*. Masson.
- Chabasse, D., Bouchara, J.-P., de Gentile, L., Brun, S., Cimon, B., & Penn, P. (2002). *les moisissures d'intérêt médical*. Ouvrage réalisé par le Laboratoire de Parasitologie-Mycologie - du CHU d'Angers.
- Frutschi, B., Oeschberg, G., Gut, K., Wallierhof, B., & Stüssi, R. (2014). *Protection phytosanitaire en horticulture*. 3e édition remaniée.
- Lepoivre, P. (2003). *Phytopathologie*. De Boeck & Larcier .
- Marchoux, G., Gognalons, P., & Sélassié, K. (2008). *Virus des Solanacées du génome viral à la protection des cultures*. Éditions Quæ.
- Monteil, C. (2011). *Écologie de Pseudomonas syringae dans un bassin versant : Vers un modèle de transfert Des habitats naturels aux agro-systèmes* (éd. Université d'avignin et des pays du Vaucluse). Thèse doctorat.
- Rajneesh , P., Avinash , M., & Prabhat, N. (2013). *Erwinia carotovora* associated with Potato: A Critical Appraisal with respect to Indian perspective. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci* , 2 (10), 83-89.

Schiffers, B., & Moreira, C. *Fondements de la protection des cultures*. PIP c/o COLEACP.

Senez, J. C. (1968). *Microbiologie générale*. Paris: Doin.

Tanguy, J. (2015). *Classification, évolution et reproduction des végétaux*. Faculté des Sciences et des Techniques | Université de Nantes.

Vojvodić, M., Lazić, D., Mitrović, P., Tanović, B., Vico, I., & Bulajić, A. (2019). Conventional and real-time PCR assays for detection and identification of *Rhizoctonia solani* AG-2-2, the causal agent of root rot of sugar beet. *Pestic. Phytomed. (Belgrade)*, 34 (1), 19-29.

Zillinsky, F., & Pelletier, M. (1983). *Maladies Communes des céréales à paille*. CIMMYT.

Références

- VICENTE, J., & HOLUB, E. (2013). *Xanthomonas campestris*pv.*campestris*(cause of black rot of crucifers) in the genomic era is still a worldwide threat to brassica crops. *Molecular plant pathology* , 14 (1), 2–18.
- Albouy, J., & Devergne, J.-C. (1998). *Maladies à virus des plantes ornementales*. INRA.
- Bailly, R., Robbe-Durand, P., Fougeroux, A., Beyt, N., d'Aguilar, J., Coutin, R., et al. (1990). *Guide pratique de défense des cultures*. Le Carrousel et ACTA.
- Biacchesi, S., Chevalier, C., Galloux, M., Langevin, C., Le Goffic , R., & Brémont, M. (2017). *Les virus ennemis ou alliés?* Éditions Quæ.
- Bouchet, P., Guignard, J.-L., Pouchus, Y.-F., & Villard, J. (2005). *Les champignons Mycologie fondamentale et appliquée*. Masson.
- Chabasse, D., Bouchara, J.-P., de Gentile, L., Brun, S., Cimon, B., & Penn, P. (2002). *les moisissures d'intérêt médical*. Ouvrage réalisé par le Laboratoire de Parasitologie-Mycologie - du CHU d'Angers.
- Frutschi, B., Oeschberg, G., Gut, K., Wallierhof, B., & Stüssi, R. (2014). *Protection phytosanitaire en horticulture*. 3e édition remaniée.
- Lepoivre, P. (2003). *Phytopathologie*. De Boeck & Larcier .
- Marchoux, G., Gognalons, P., & Sélassié, K. (2008). *Virus des Solanacées du génome viral à la protection des cultures*. Éditions Quæ.
- Monteil, C. (2011). *Écologie de Pseudomonas syringae dans un bassin versant : Vers un modèle de transfert Des habitats naturels aux agro-systèmes* (éd. Université d'avignin et des pays du Vaucluse). Thèse doctorat.

Rajneesh , P., Avinash , M., & Prabhat, N. (2013). *Erwinia carotovora* associated with Potato: A Critical Appraisal with respect to Indian perspective. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci* , 2 (10), 83-89.

Schiffers, B., & Moreira, C. *Fondements de la protection des cultures*. PIP c/o COLEACP.

Senez, J. C. (1968). *Microbiologie générale* . Paris: Doin.

Tanguy, J. (2015). *Classification, évolution et reproduction des végétaux*. Faculté des Sciences et des Techniques | Université de Nantes.

Vojvodić, M., Lazić, D., Mitrović, P., Tanović, B., Vico, I., & Bulajić, A. (2019). Conventional and real-time PCR assays for detection and identification of *Rhizoctonia solani* AG-2-2, the causal agent of root rot of sugar beet. *Pestic. Phytomed. (Belgrade)* , 34 (1), 19-29.

Zillinsky, F., & Pelletier , M. (1983). *Maladies Communes des céréales à paille*. CIMMYT.