

Interaction hôtes -pathogènes et mécanismes de défense

Niveau M1 : spécialité protection des végétaux

Présenté par Dr SAADI Ines

Chapitre 1: L'infestation

Introduction

L'infestation des parties aériennes d'un végétal désigne l'attaque des feuilles, des tiges, des fleurs ou des fruits par des organismes ravageurs ou pathogènes. Contrairement aux attaques souterraines, ces infestations sont souvent visibles et impactent directement la photosynthèse et la reproduction de la plante.

1 sur la partie aériennes du végétal

1. Principaux types de ravageurs (Insectes et Acariens)

Les parties aériennes sont principalement colonisées par des insectes piqueurs-suceurs ou broyeur :

Pucerons, cochenilles et aleurodes : Ils sucent la sève, provoquant une décoloration des feuilles et la sécrétion de miellat, une substance collante favorisant l'apparition de la fumagine (champignon noir poudreux).

Thrips : Ils causent l'apparition de petits points clairs ou de rayures argentées sur les feuilles et les boutons floraux.

Acariens (Araignées rouges) : Ils se cachent sous les feuilles, créant de fines toiles et provoquant un jaunissement du feuillage, surtout en atmosphère sèche.

Les symptômes sur feuilles 1: trips de tomate 2: pucerons



Les symptômes sur feuilles 1: trips de tomate 2: **cochenilles**



Les symptômes sur feuilles Acariens (Araignées rouges)



2. Maladies communes des parties aériennes

Ces maladies sont souvent dues à des champignons (maladies cryptogamiques) ou des bactéries :

Oïdium ("Maladie du blanc") : Se manifeste par un feutrage blanc poudreux sur les feuilles, les tiges et les fleurs.

Mildiou : Provoque des taches sombres sur la face supérieure des feuilles et parfois un duvet blanchâtre dessous.

Rouille : Caractérisée par des pustules oranges ou brunes, principalement sur la face supérieure des feuilles.

Botrytis (Pourriture grise) : Apparition d'une moisissure grisâtre sur les fleurs et les fruits en cas d'humidité excessive.

Fumagine : Dépôt noir secondaire, conséquence de la présence d'insectes producteurs de miella

Les symptômes sur feuilles de tomate 1 oidium 2 mildiou



Les symptômes sur feuilles de tomate 1 rouille 2 Botrytis



Les symptômes sur feuilles de tomate fumagine



3, Symptômes Généraux à Observer

- a) Déformations : Feuilles gaufrées, enroulées ou nanisme des pousses.
- b) Changements de couleur : Décoloration, taches nécrotiques ou jaunissement prématuré.
- c) Présence de substances : Miellat collant, sécrétions cotonneuses ou filaments de soie.

1- 1 La cuticule

L'infestation au niveau de la cuticule la couche cireuse protectrice qui recouvre l'épiderme des feuilles et des tiges est une étape critique pour les bioagresseurs.

Étant la première barrière physique de la plante, son altération compromet directement l'étanchéité et la santé du végétal.

A/ Perforation par les insectes piqueurs-suceurs

- Ces insectes possèdent des pièces buccales (stylets) capables de transpercer la cuticule pour atteindre le phloème (sève).
- Pucerons et Altises : Leurs piqûres créent des micro-lésions qui favorisent l'évapotranspiration et l'entrée de pathogènes.
- Cochenilles : Elles se fixent sur la cuticule et sécrètent des substances qui peuvent ramollir les cires protectrices pour faciliter leur nutrition.



B. Dégradation par les champignons (Pathogènes)

Certains champignons ont développé des mécanismes spécifiques pour franchir cette barrière :

Appressoria : Des champignons comme l'oidium ou la rouille forment des organes de fixation qui exercent une pression mécanique et chimique (enzymes) pour perforer la cuticule.

Enzymes cutinolytiques : Les agents pathogènes sécrètent des cutinases qui dissolvent la cutine (principal composant de la cuticule), permettant au mycélium de pénétrer dans les tissus internes.

Un appressorium (pluriel : appressoria) est une structure spécialisée, souvent en forme d'ampoule, formée par des champignons parasites ou symbiotiques (principalement des plantes) à l'extrémité d'un tube germinatif. Il assure l'adhérence à la surface de l'hôte et exerce une pression mécanique ou chimique pour pénétrer l'épiderme

Caractéristiques principales :

Fonction : Ancrage et pénétration active de la cuticule de l'hôte.

Mécanisme : Développe une forte pression de turgescence (via le glycérol) et utilise des enzymes pour rompre la paroi cellulaire.

Structure : Extrémité enflée et épaissie d'une hyphe.

Infection : C'est le point de départ de la formation d'un hyphe de pénétration.

C. Obstruction par la Fumagine

- a) La cuticule n'est pas consommée ici, mais recouverte.
- b) Le mécanisme : Les insectes (pucerons, aleurodes) rejettent du miellat collant sur la cuticule. Un champignon noir, la fumagine, s'y développe.
- c) Conséquence : Ce dépôt noir bloque la lumière, empêchant la photosynthèse à travers la cuticule et provoquant un échauffement thermique de la feuille.

D. Symptômes visibles sur la cuticule

- Aspect dépoli ou argenté : Typique des attaques de thrips qui vident les cellules épidermiques sous la cuticule, laissant entrer de l'air.
- Taches d'aspect "huileux" : Signe précurseur du mildiou indiquant une désorganisation des cires cuticulaires.
- Dépôts pulvérulents : Feutrage blanc de l'oïdium qui s'installe directement à la surface.

Protection et Lutte

Pour renforcer cette barrière ou traiter une infestation cutanée :

Silice : L'apport de silice (via le purin de prêle) renforce la dureté de la cuticule.

Savon noir : Utilisé en pulvérisation, il nettoie le miellat et la fumagine, et asphyxie les insectes à corps mou fixés sur la cuticule.

Huiles végétales : Elles créent un film qui empêche l'adhésion des spores de champignons sur la cire.

Le purin de prêle est un engrais liquide et un stimulateur de défenses naturelles (SDN) obtenu par la fermentation de *Equisetum arvense* (prêle des champs) dans l'eau. Riche en silice, en potassium et en calcium, il renforce la structure cellulaire des plantes, agissant comme un puissant antifongique préventif (contre l'oïdium, le mildiou, la rouille) et un répulsif contre certains insectes.

1-2 La phylloplan

L'infestation du phylloplan (la surface physique stricte de la feuille) représente la phase initiale de colonisation par des micro-organismes, qu'ils soient bénéfiques (épiphytes) ou pathogènes. Contrairement à la phyllosphère qui englobe tout l'habitat aérien, le phylloplan se concentre sur l'interface directe entre la plante et son environnement.

1-2-1 Colonisation Microbienne (Bactéries et Champignons)

- **Le phylloplan** est un environnement hostile (UV, variations de température, faible humidité) où les pathogènes doivent s'ancrer solidement :
- **Adhésion et Biofilms** : Les bactéries utilisent des substances polymères pour former des biofilms, des structures protectrices qui leur permettent de résister au lessivage par la pluie et de se multiplier sur la surface avant l'infection.
- **Survie Épiphyte** : De nombreux agents pathogènes vivent de manière "saprophyte" ou épiphyte sur le phylloplan, se nourrissant des nutriments (sucres, acides aminés)

1-2-2 Interactions avec les Ravageurs

Le phylloplan est le siège d'interactions complexes entre la plante, les insectes et les microbes :

Influence des Métabolites : La présence de glucides (fructose, glucose) à la surface de la feuille influence le choix des insectes pour la ponte ou l'alimentation.

Vecteurs de Pathogènes : Les insectes comme les thrips ou les aleurodes se déplacent sur le phylloplan et transportent des spores de champignons ou des bactéries d'une feuille à l'autre.

1-2-3 Signes d'une Infestation du Phylloplan

Avant que les tissus internes ne soient endommagés, plusieurs signes peuvent être observés à la surface :

Dépôts de miellat et fumagine : Les insectes suceurs rejettent un liquide sucré sur le phylloplan, favorisant le développement d'un champignon noir (la fumagine) qui recouvre la surface et bloque la lumière.

Points clairs et argentés : Signe que des ravageurs (comme les thrips) ont commencé à vider les cellules situées juste sous la surface protectrice.

Feutrages poudreux : Comme l'oïdium, qui colonise le phylloplan de manière externe, créant un voile blanc caractéristique.

Gestion et Protection

Pour limiter l'infestation du phylloplan les stratégies privilégient le maintien de l'équilibre biologique :

Utilisation d'auxiliaires : Attirer des insectes prédateurs (via des plantes comme l'aneth ou la valériane) pour réguler les populations de ravageurs directement sur la surface foliaire.

Protection microbiologique : Encourager la présence de bactéries épiphytes bénéfiques qui entrent en compétition avec les pathogènes pour les ressources du phylloplan.

Hygiène : Nettoyer les dépôts (savon noir) ou isoler les plantes fortement infestées pour stopper la propagation rapide des colonies de thrips ou de cochenilles.

1- 3 la germination

La germination au niveau des parties aériennes (phylloplan et cuticule) est l'étape décisive où une spore de champignon ou de protiste parasite passe d'un état de dormance à une phase d'infection active. Ce processus est le préambule nécessaire à toute invasion des tissus internes de la plante.

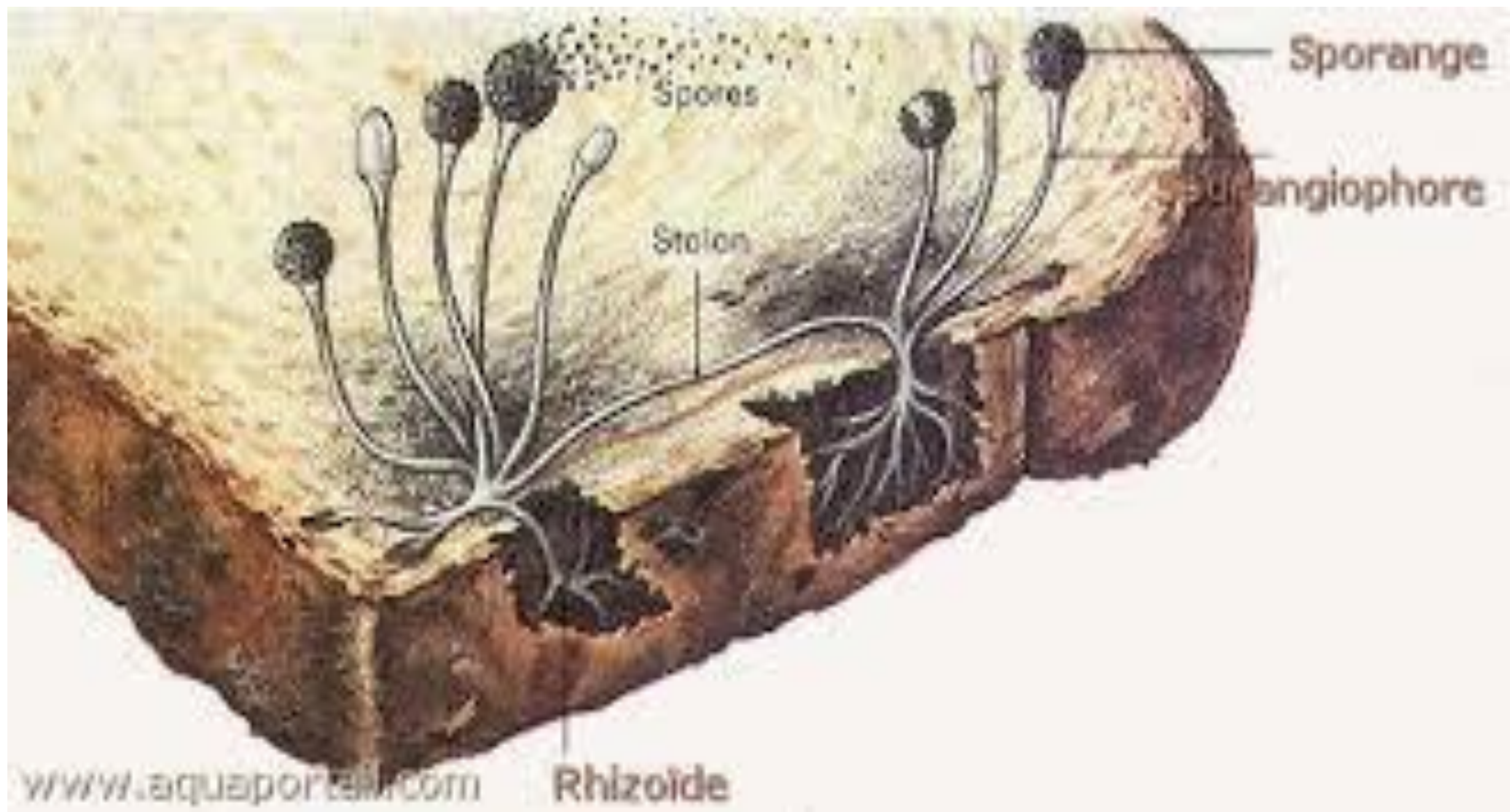
1-3-1. Les Étapes de la Germination sur le Végétal

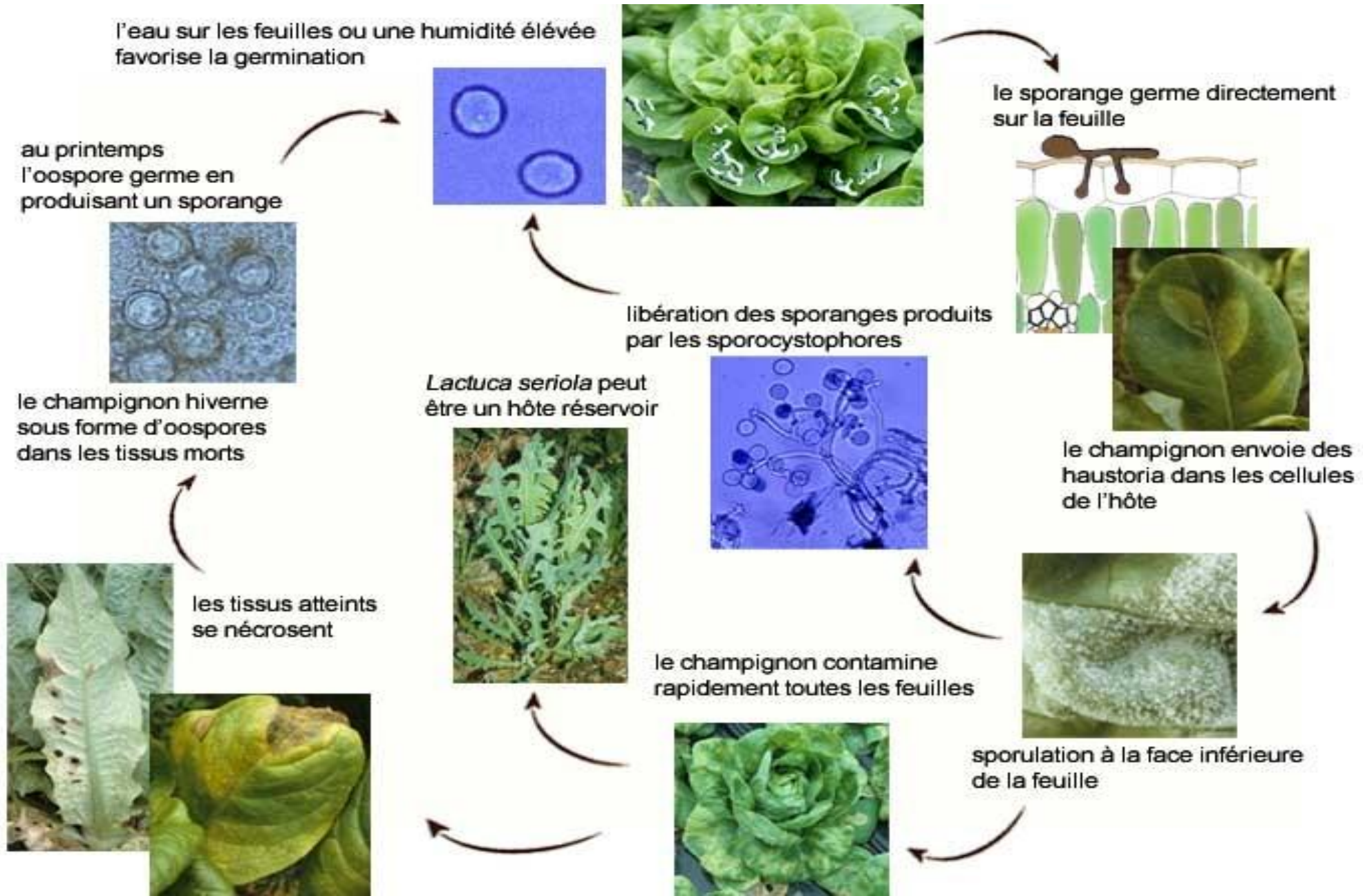
Le cycle commence dès que les spores, dispersées par le vent, l'eau ou les insectes, atterrissent sur la surface foliaire :

Activation : La spore dormante "capte" des signaux favorables (humidité, nutriments résiduels sur la feuille) qui déclenchent son réveil métabolique.

Hydratation (Imbibition) : La spore absorbe l'eau présente sur le phylloplan (rosée, pluie), ce qui provoque son gonflement et l'hydrolyse de ses réserves internes.

Émission du tube germinatif : Une croissance polarisée se met en place, formant un filament microscopique (le tube germinatif) qui s'allonge à la surface de la cuticule.





1-3-2. Facteurs Favorisants

La réussite de cette germination dépend de paramètres environnementaux précis :

Humidité relative élevée : Une pellicule d'eau liquide ou une hygrométrie proche de 90-100 % est souvent indispensable pour la majorité des champignons pathogènes.

Température : La vitesse de germination est optimale entre 15°C et 25°C pour de nombreuses espèces foliaires. Les îlots de chaleur urbains peuvent accélérer ce développement en maintenant des températures douces durant la nuit.

Exsudats foliaires : Les sucres et acides aminés qui suintent naturellement de la plante servent de carburant initial au tube germinatif avant qu'il ne pénètre dans l'hôte.

1-3-3. De la Germination à la Pénétration

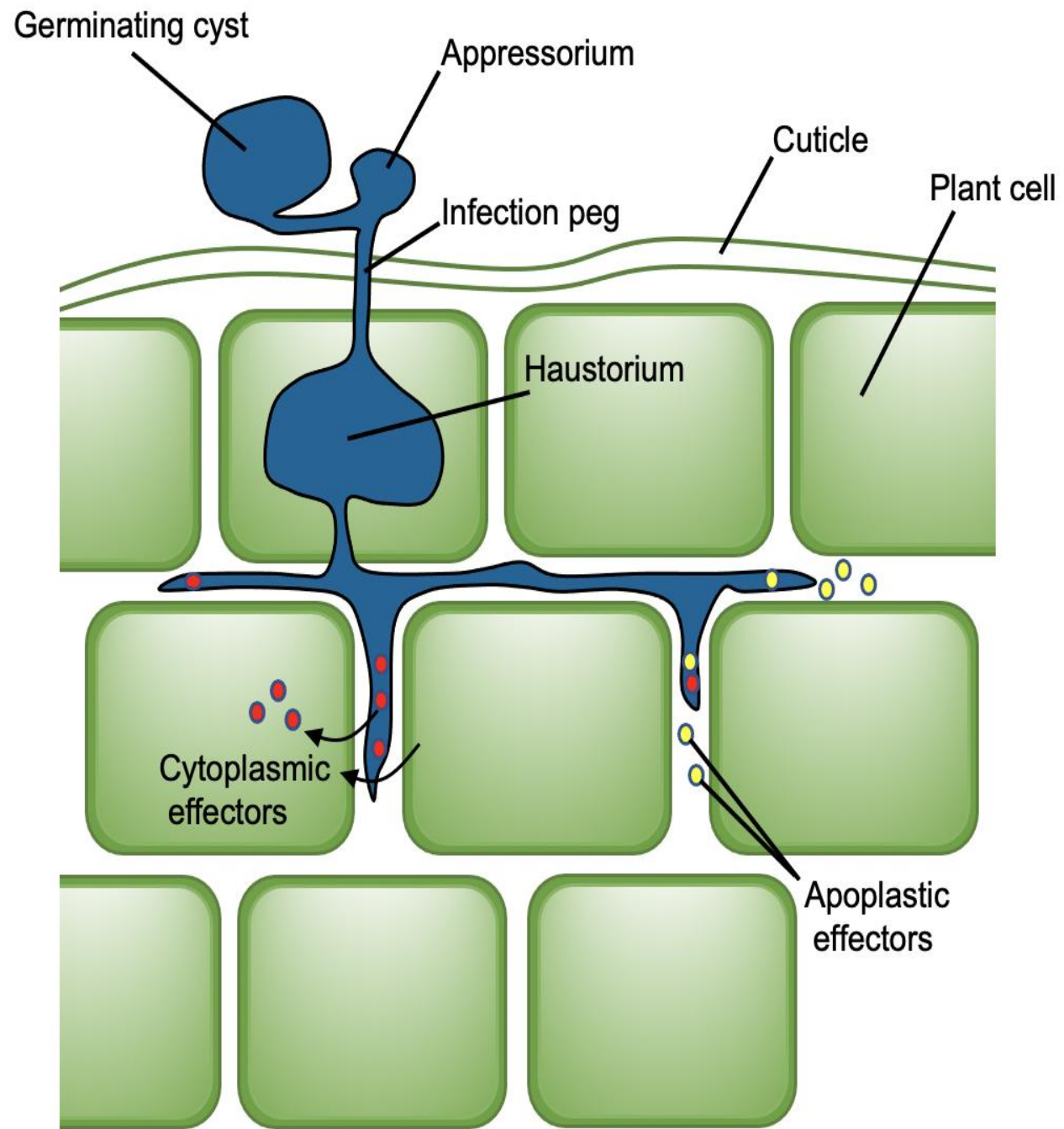
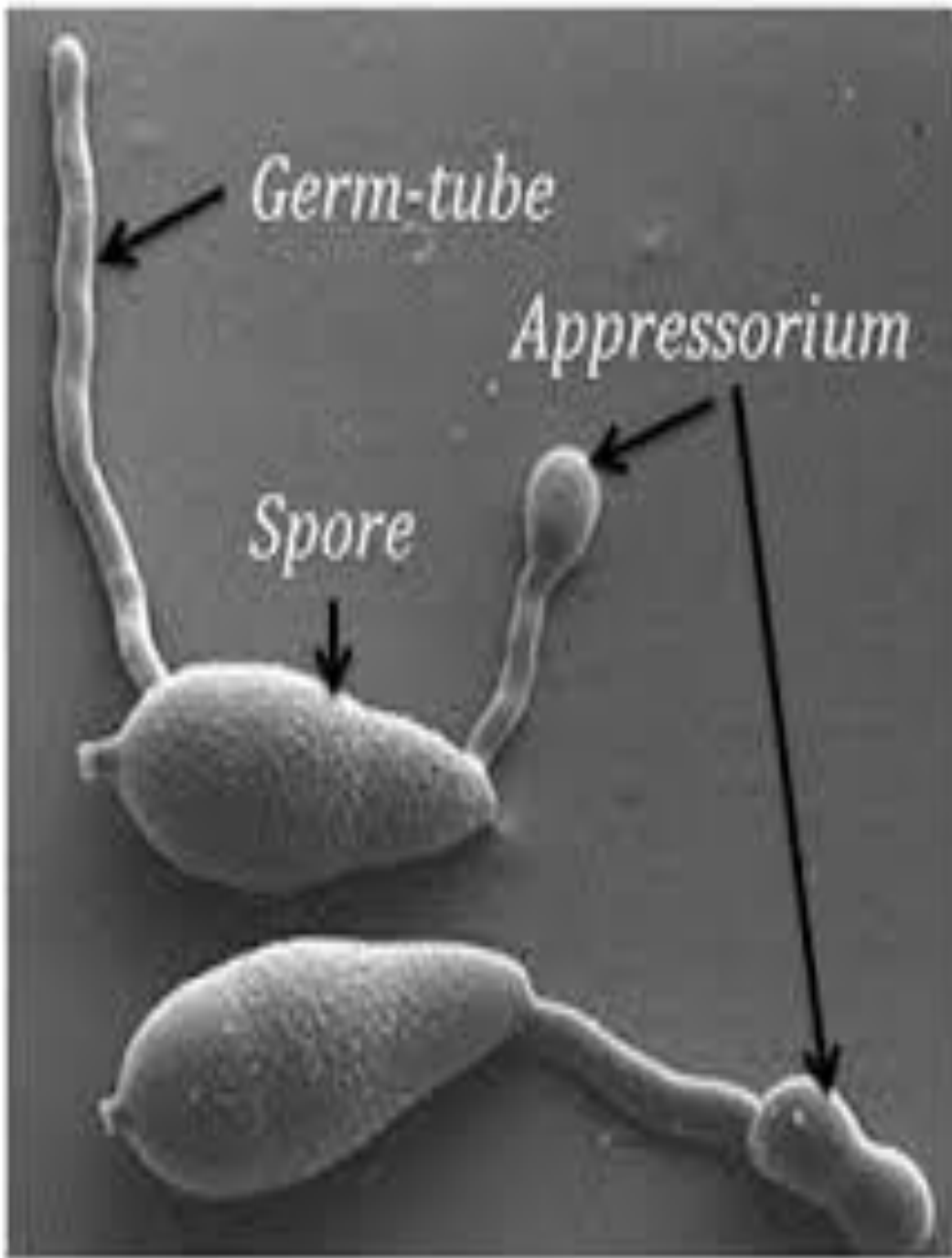
Une fois germé, le pathogène doit franchir la barrière de la cuticule pour se nourrir :

Formation de l'appressorium : Le tube germinatif se renfle pour former une structure de fixation puissante qui exerce une pression mécanique sur la paroi végétale.

Sécrétion enzymatique : Le champignon libère des cutinases pour dissoudre chimiquement la couche cireuse et s'introduire dans le parenchyme foliaire.

Prévention : la gestion des maladies aériennes mise sur la rupture de ce cycle de germination via des traitements préventifs au bicarbonate de soude ou au soufre, qui modifient le pH et les conditions chimiques du phylloplan, rendant la germination des spores impossible

Un appressorium (pluriel : appressoria) est une structure spécialisée en forme de dôme, formée à l'extrémité d'une hyphé ou d'un tube germinatif de champignons parasites, essentielle pour l'infection des plantes hôtes. Il adhère fermement à la surface de l'hôte et exerce une pression mécanique élevée pour pénétrer la cuticule.



1-4 La pénétration

La pénétration est l'étape où le bioagresseur franchit les barrières externes du végétal pour envahir les tissus internes (parenchyme, vaisseaux conducteurs). Elle fait suite à la germination et conditionne la réussite de l'infection.

Il existe trois voies principales de pénétration dans les parties aériennes

1- 4-1 Pénétration Active (directe)

Certains champignons et protistes fongiformes utilisent la force pour entrer.

Force mécanique : Le tube germinatif forme un appressorium qui exerce une pression physique intense sur la cuticule.

Action enzymatique : Le pathogène sécrète des enzymes (cutinases, pectinases) pour dissoudre chimiquement la cutine et les parois cellulaires

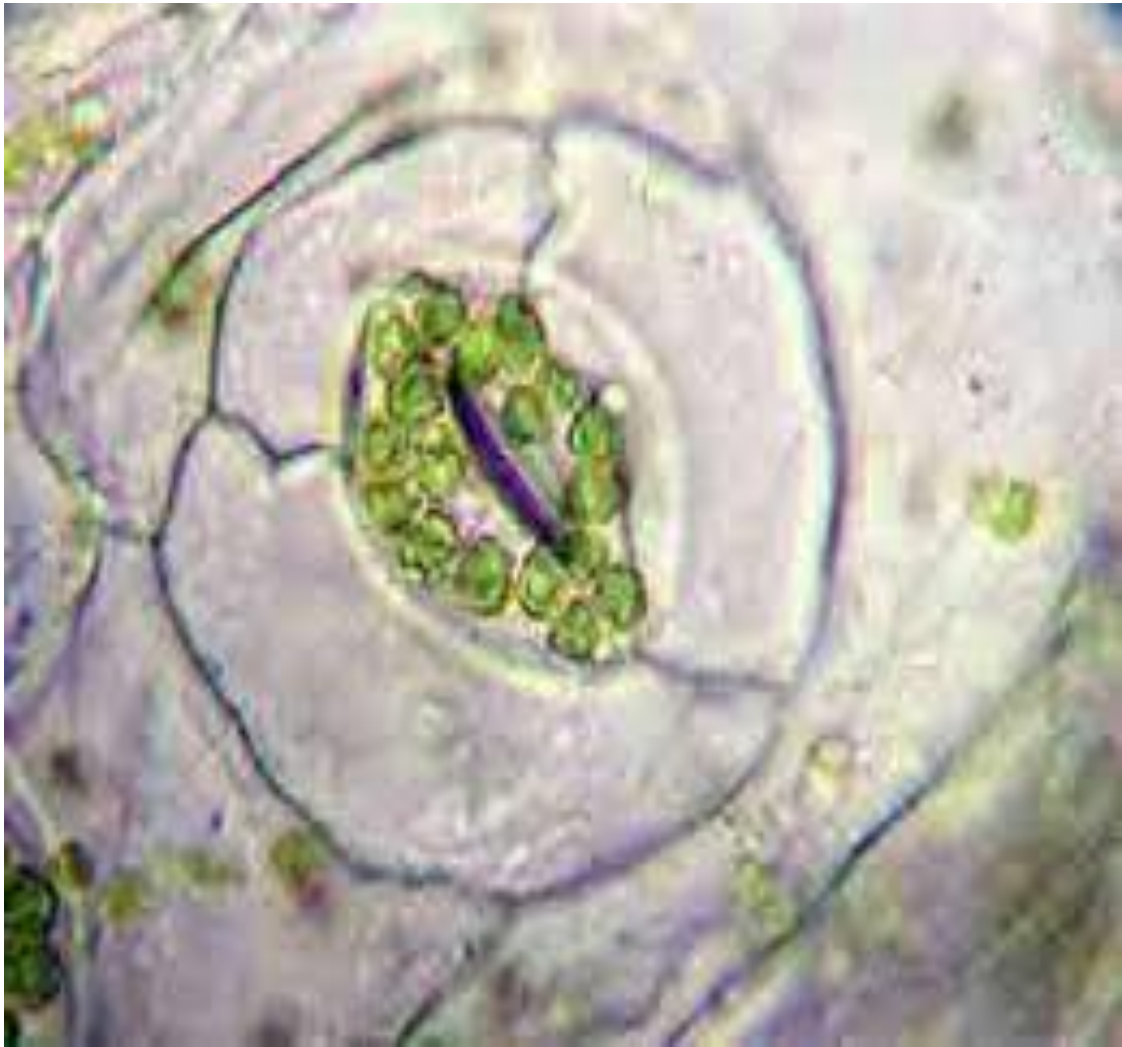
1-4-2. Pénétration Passive (Ouvertures Naturelles)

De nombreux agents pathogènes, notamment les bactéries qui ne peuvent pas perforer la cuticule d'elles-mêmes, profitent des entrées existantes :

Stomates : Ces pores servant aux échanges gazeux sont les portes d'entrée privilégiées pour les bactéries et certains champignons (mildiou).

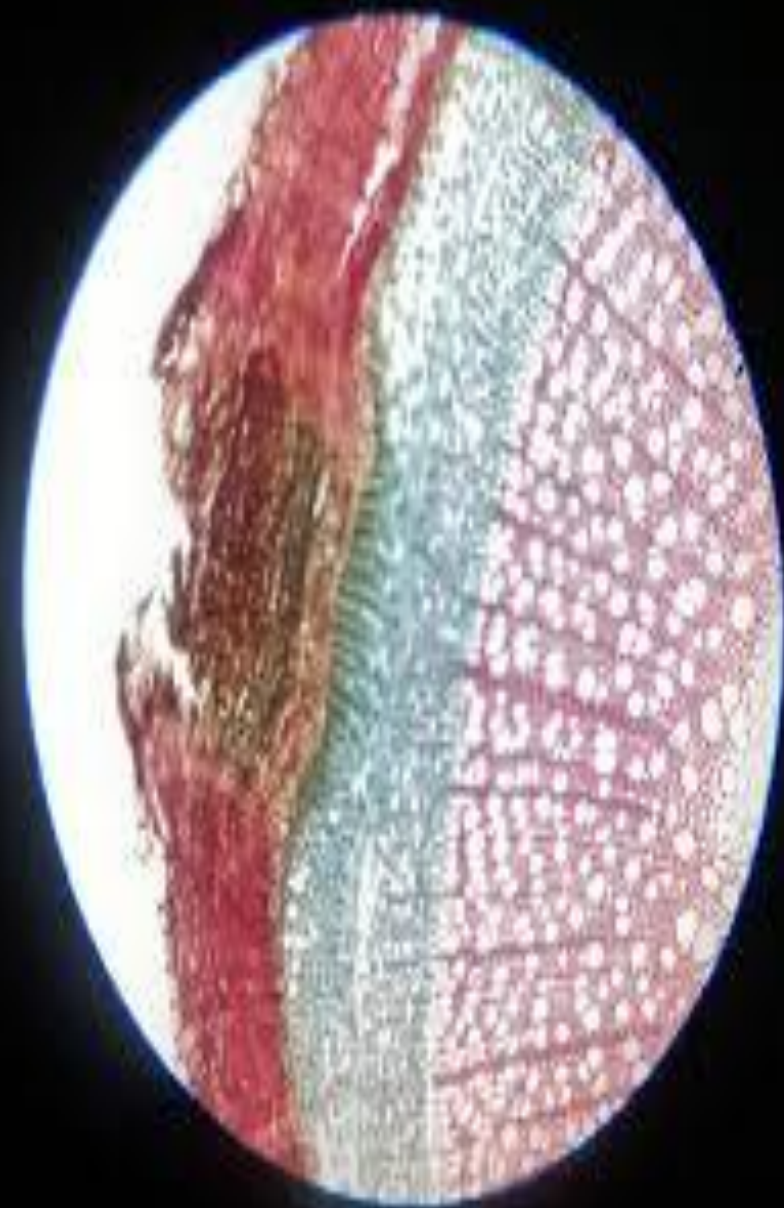
Hydathodes : Ouvertures situées à l'extrémité des nervures par lesquelles s'échappe l'eau de guttation.

Lenticelles : Petites pores présentes sur les tiges et l'écorce





Hydathodes are the small pores located on the leaf Margins. These are responsible for **Guttation** in vascular plants. This organ connects the plant vascular system to external environment. **Vascular Pathogens enter through them.**



1-4-3. Pénétration par Blessures et Vecteurs

Blessures : Les déchirures causées par le vent, la grêle, la taille ou les frottements offrent un accès direct et facile aux tissus nutritifs.

Vecteurs (Inoculation) : Les insectes piqueurs-suceurs (pucerons, thrips) agissent comme des seringues. En perçant la cuticule avec leur stylet pour se nourrir, ils injectent directement des virus ou des bactéries dans le système vasculaire (phloème).

Conséquences immédiates

Une fois la barrière franchie, le pathogène entame la phase de colonisation :

Mouvement de cellule à cellule : Les virus utilisent les plasmodesmes (canaux entre les cellules) pour se propager lentement.

Mouvement à longue distance : Le pathogène atteint les vaisseaux conducteurs pour envahir toute la plante de manière systémique.

Diagnostic : Pour identifier une pénétration en cours, recherchez des "points de piqûres" ou des zones d'aspect huileux.

2- L'infestation sur les souterraines du végétal

L'infestation des parties souterraines d'un végétal (racines, tubercules, bulbes) est principalement causée par trois types de bioagresseurs.

A/ Les ravageurs du sol (Faune)

Nématodes : Vers microscopiques provoquant des galles ou le flétrissement de la plante.

Larves d'insectes : Les larves de hannetons (vers blancs), de taupins (vers fil de fer) ou de la mouche de la carotte creusent des galeries et coupent les racines.

Pucerons radicicoles : S'attaquent aux racines, affaiblissant la plante et favorisant les maladies.

Radicicole est un adjectif qualifiant des organismes, principalement des insectes ou des parasites, qui vivent, se nourrissent ou se développent sur les racines des plantes





Fragment de racine, avec nodosités et formes radicicoles.

Photo : <http://www.vigneviraudouest.com/publications/fiches-pratiques/phyloxera.php>

B/ Les agents pathogènes (Maladies)

Pourriture racinaire (Oomycètes/Champignons) :
Le Phytophthora, le Pythium (fonte des semis) ou le Rhizoctonia provoquent le brunissement et la décomposition des racines dans les sols trop humides.

Hernie du chou : Un champignon (Plasmodiophora brassicae) qui provoque des excroissances déformant les racines.

Flétrissement bactérien : Des bactéries qui colonisent les vaisseaux conducteurs à partir du sol.

C/ Symptômes visibles en surface

Comme l'infestation est cachée, elle se manifeste souvent par :

- Un arrêt de croissance soudain.
- Un jaunissement ou un flétrissement des feuilles malgré un arrosage correct.
- Une plante qui se déchausse ou s'arrache trop facilement.

Solutions et Prévention

Rotation des cultures : Pour briser le cycle de vie des parasites.

Drainage : L'excès d'eau favorise les pourritures fongiques.

Auxiliaires : Utiliser des nématodes bénéfiques (comme *Steinernema*) pour éliminer les larves de ravageurs.

Analyse du sol : Identifier le pathogène via le service de diagnostic pour un traitement ciblé.

2-1 L'infestation sur les souterraines du végétal spores dans le sol

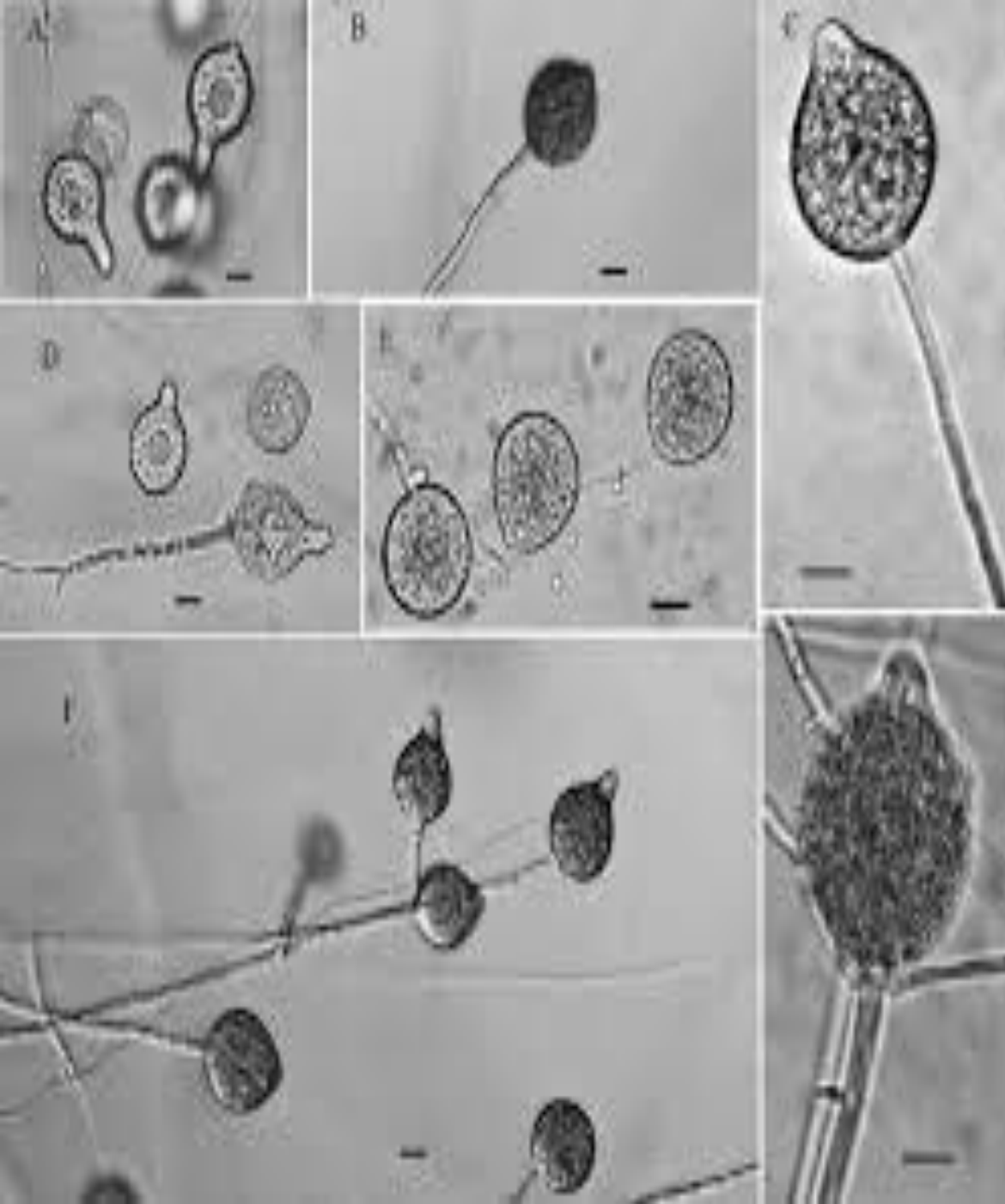
L'infestation des parties souterraines des végétaux par des spores dans le sol correspond principalement aux maladies cryptogamiques telluriques. Ces agents pathogènes (champignons et oomycètes) utilisent les spores comme structures de survie capables de persister des années dans la terre avant d'infecter les racines

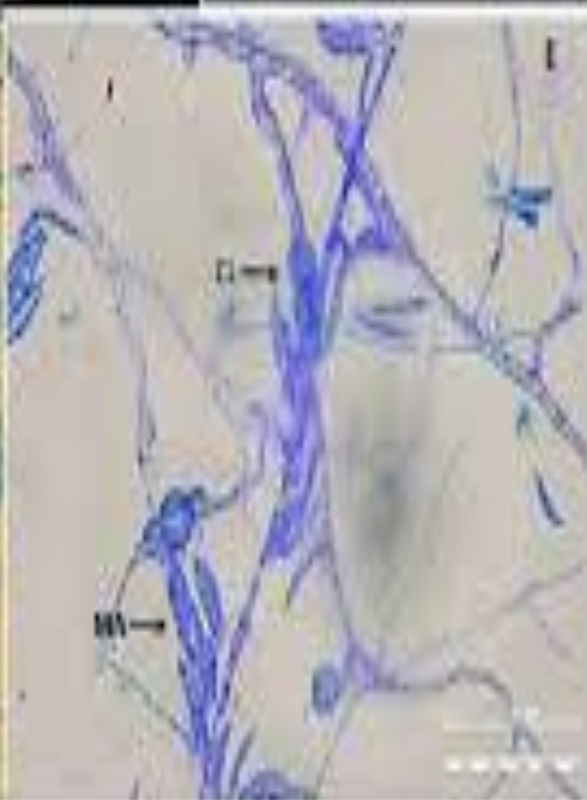
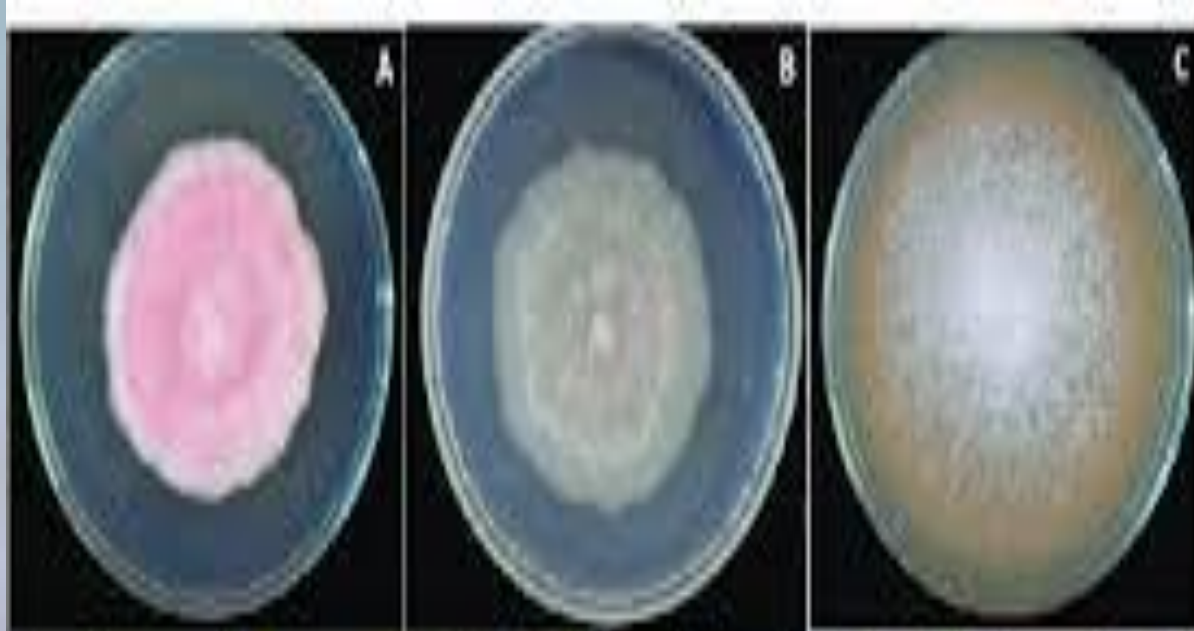
2-1-1. Principaux agents pathogènes et leurs spores

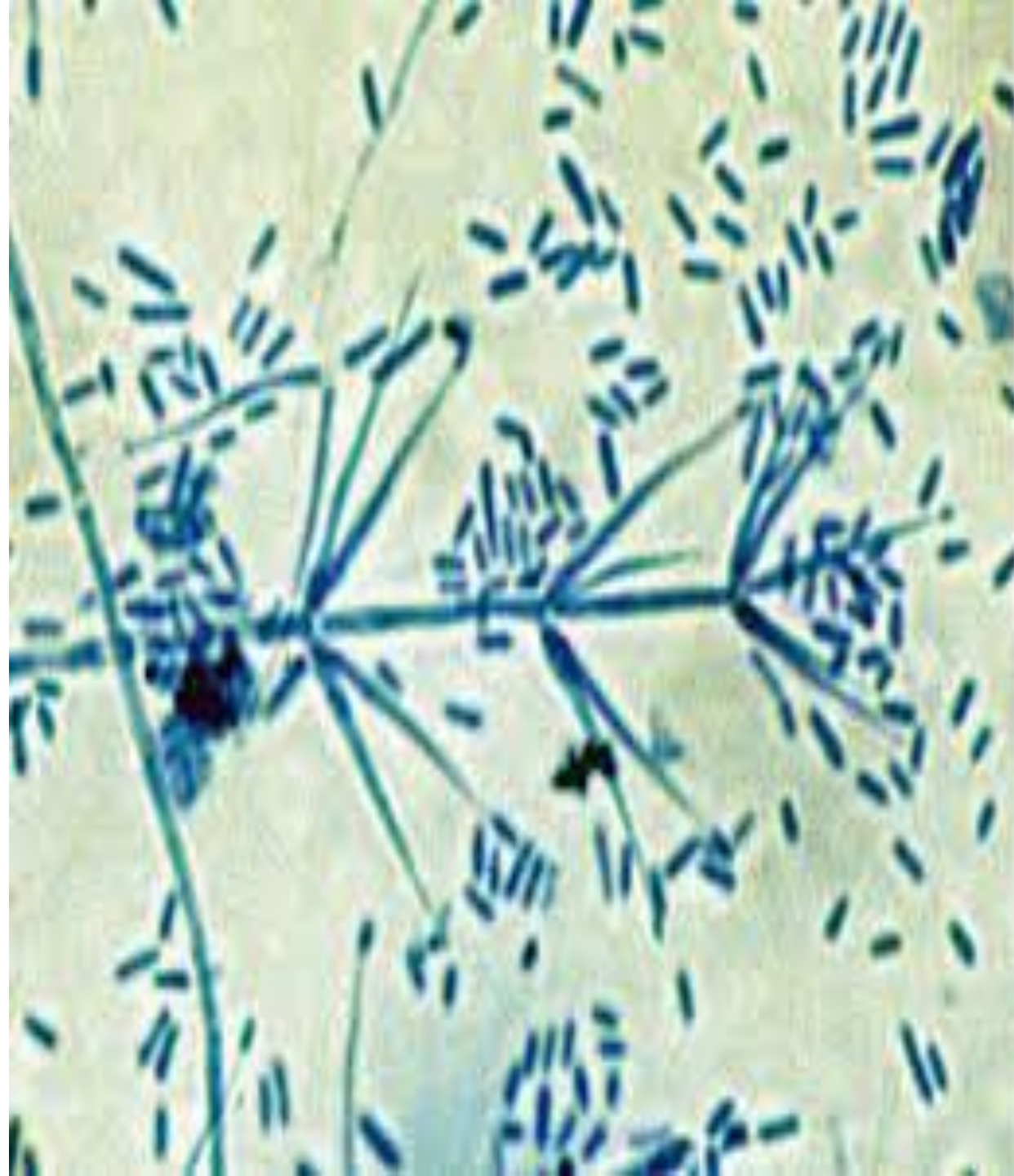
- **Phytophthora & Pythium** : Ces oomycètes produisent des oospores (survie longue durée) et des zoospores mobiles qui nagent dans l'eau du sol pour atteindre les racines, causant la fonte des semis et la pourriture racinaire.
- **Fusarium & Verticillium** : Ces champignons produisent des spores résistantes (chlamydospores) qui colonisent les vaisseaux conducteurs de sève, provoquant le flétrissement vasculaire.
- **Rhizoctonia solani** : Forme des sclérotés (amas de mycélium denses agissant comme des spores) qui attaquent le collet et les racines.













2-1-2. Processus d'infestation

Survie : Les spores restent dormantes dans le sol ou sur des débris végétaux. survivent dans le sol sous forme de structures de conservation (sclérotés, chlamydospores) ou de mycélium dans les débris végétaux, certains persistant pendant plusieurs années.

Des pathogènes comme *Fusarium* ou *Sclerotinia* résistent aux conditions défavorables, nécessitant souvent une solarisation ou un compostage supérieur à 60°C pour être détruits. La rotation des cultures est cruciale pour réduire ces inoculum telluriques.

a/ Mécanismes de survie dans le sol

Structures de conservation : Certains champignons forment des structures résistantes, comme les chlamydospores à parois épaisses chez *Fusarium* ou les sclérotés du *Sclerotinia* (2-20 mm), capables de survivre longtemps dans les premiers centimètres du sol.

Saprophytisme : De nombreux pathogènes, notamment *Fusarium oxysporum*, peuvent survivre en se nourrissant de débris organiques dans le sol (vie saprophytique) en attendant un hôte.

Survie sur les résidus : Le mycélium persiste dans les débris végétaux infestés.

Dimorphisme : Certains champignons pathogènes s'adaptent aux conditions du sol en alternant entre des formes de levure et de moisissure

b/ Facteurs influençant la persistance

Température : La plupart sont éliminés après 30 minutes à 55°C, mais certains, comme le **Fusarium** ou la **Plasmodiophora brassicae**, nécessitent des températures supérieures (plus de 60°C).

Humidité : Des conditions humides favorisent la survie et la propagation de nombreux champignons telluriques, avec des impacts majeurs sur les cultures (jusqu'à 30% de perte).

Durée : Les nématodes et champignons peuvent survivre plus de 10 ans dans le sol, d'où l'importance de la gestion des résidus

Activation :L'activation des champignons pathogènes dans le sol est déclenchée par des signaux de l'hôte (exsudats des racines) à proximité des racines ou des facteurs environnementaux comme une forte humidité, une mauvaise aération, ou la présence de débris végétaux.

Ces champignons, souvent sous forme de spores dormantes, germent et infectent les plantes, causant des maladies racinaires, des flétrissements et la pourriture

Mécanismes d'Activation (Signalisation) : Les champignons pathogènes du sol (tels que *Fusarium*, *Pythium*, *Rhizoctonia*) détectent les exsudats racinaires (sucres, acides aminés) émis par les plantes hôtes, ce qui déclenche la germination de leurs spores.

Facteurs Favorisants : Un excès d'eau dans le sol, un manque de circulation de l'air, et une température optimale favorisent la mobilité des zoospores (comme chez *Phytophthora*) et l'infection.

Processus d'Infection : Après germination, les hyphes pénètrent directement l'épiderme, via les stomates ou par des blessures racinaires.

Adaptation : Ces champignons peuvent surmonter les défenses de la plante, notamment les phytoalexines, en induisant des voies de signalisation spécifiques.

Contrôle/Survie : Bien que souvent dormants, ces agents pathogènes peuvent persister longtemps dans le sol. La biodiversité du sol, incluant des micro-organismes antagonistes (ex: *Trichoderma*), peut limiter leur activation et développement, un phénomène connu sous le nom de sols suppressifs

Colonisation : les champignons infectent les plantes par les racines, causant des maladies racinaires ou vasculaires, et se propagent via l'eau ou les mouvements de terre.

Survie et persistance : Les pathogènes du sol (telluriques) survivent sous forme de spores de conservation très résistantes, leur permettant de persister longtemps dans l'environnement.

Conditions favorables : L'excès d'humidité (pluies abondantes, mauvaise gestion de l'irrigation) et la présence de matière organique en décomposition favorisent leur développement.

Infection racinaire : Les champignons se développent dans le sol, souvent en profusion mycélienne, et pénètrent les tissus des plantes hôtes par les racines, obstruant les vaisseaux conducteurs (comme pour le *Verticillium*).

Propagation : La dissémination se fait par l'eau du sol, le matériel agricole contaminé, ou par des spores flagellées chez certains pathogènes comme le *Pythium*.

Compétition et suppression : La densité de ces champignons est régulée par la compétition avec d'autres microorganismes. Certains sols sont dits "suppressifs" et limitent naturellement le développement des pathogènes, un phénomène souvent affaibli par l'intensification des cultures

2-1-3. Symptômes et Diagnostic

Symptômes : Jaunissement, flétrissement soudain (souvent par temps chaud), et décomposition des racines (tissus bruns et mous).

Diagnostic : Une analyse en laboratoire est souvent nécessaire pour identifier précisément le type de spore, mais l'observation de "manques" circulaires dans les cultures est un indicateur fréquent d'infestation tellurique.

2-1-4. Moyens de lutte

- Assainissement : Retirer et détruire (ne pas composter) les plantes infectées et la terre environnante pour limiter la dispersion des spores.
- Gestion de l'eau : Améliorer le drainage, car l'excès d'humidité est le principal facteur déclenchant la germination des spores.
- Biosolarisation : Utiliser la chaleur solaire sous bâche plastique pour désinfecter les couches superficielles du sol.
- Rotation : Alternier avec des espèces non-hôtes pour réduire la concentration de spores spécifiques au fil du temps.

2-2 Exsudats des racines

Les exsudats racinaires jouent un rôle central dans l'infestation souterraine des végétaux en agissant comme des signaux chimiques qui attirent et activent les pathogènes du sol.

la compréhension de ces interactions permet de mieux anticiper les maladies telluriques.

Comment les exsudats influencent l'infestation !!!

1. Des signaux d'attraction (Chimiotactisme)

Les racines libèrent continuellement des molécules carbonées (sucres, acides aminés, acides organiques) dans la rhizosphère.

Attraction des pathogènes : Ces substances servent de "guides" pour les agents pathogènes mobiles, comme les zoospores de *Phytophthora* ou certains nématodes, qui nagent vers la racine en suivant le gradient de concentration des exsudats.

Spécificité : La composition chimique des exsudats permet parfois au pathogène de reconnaître sa plante hôte spécifique.

2. Le déclenchement de l'infection

Les exsudats ne sont pas seulement des nutriments ; ils sont des interrupteurs biologiques :

Germination des spores : Les spores dormantes dans le sol (comme celles du *Fusarium*) ne germent qu'en présence de signaux chimiques émis par les racines, évitant ainsi de s'épuiser dans un sol sans hôte.

Formation de structures d'attaque : Ils peuvent induire la formation d'appressoria (organes de pénétration) chez certains champignons parasites

3. Modification en cas de stress ou d'attaque

Lorsqu'une plante commence à être infestée, la nature de ses exsudats change :

Appel au secours : Certaines plantes modifient leurs exsudats pour recruter des bactéries bénéfiques (PGPR) (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria ou Rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes) afin de combattre l'agresseur.

Fuite de nutriments : Les lésions causées par les premières attaques (insectes, nématodes) augmentent la fuite passive d'exsudats, ce qui attire encore plus de pathogènes secondaires, aggravant l'infestation (phénomène de complexe parasitaire).

4. Application en lutte biologique

Plantes pièges : Utiliser des plantes qui émettent des exsudats attractifs mais qui ne permettent pas le développement du pathogène (ex: la moutarde brune contre certains champignons).

Éliciteurs : Stimuler les défenses naturelles de la plante pour qu'elle produise des exsudats contenant des composés antimicrobiens (phénols) afin d'assainir la rhizosphère.

Chapitre II: Réactions de l'hôte

Les réactions de l'hôte face à une agression (infection, parasite, greffe) impliquent une réponse immunitaire complexe, innée puis adaptative, visant à éliminer l'intrus. Elles se manifestent par des mécanismes de défense (inflammation, fièvre) ou des réactions pathologiques excessives (immunopathologie, allergies).

Les plantes réagissent aux attaques (pathogènes, insectes) par des mécanismes de défense passifs (barrières physiques) et actifs, incluant des réponses immunitaires comme la production de phytoalexines, l'hypersensibilité (mort cellulaire locale) et des modifications structurelles (galles). Ces réactions visent à limiter la propagation de l'agent pathogène.

- **Défenses passives** : Structures préexistantes comme la cuticule, les cires, les poils ou la rigidité des parois cellulaires qui empêchent l'entrée des parasites.
- Réactions immunitaires (actives) :
- **Reconnaissance et signalisation** : Détection de molécules étrangères (PAMPs) par des récepteurs membranaires, entraînant la fermeture des stomates pour bloquer l'entrée.
- **Réponse hypersensible (HR)** : Mort cellulaire rapide et localisée autour du site d'infection pour affamer et confiner le parasite.
- **Production de composés antimicrobiens** : Synthèse de phytoalexines (substances de défense) et renforcement des parois (lignification).
- Interférence à ARN : Mécanisme génétique permettant de détruire l'ARN des virus.
- **Symptômes systémiques** : En cas d'infection généralisée, la plante peut réagir par le jaunissement, le flétrissement, le nanisme ou la formation de galls.
- La compatibilité entre la plante et l'agent pathogène détermine si la plante est sensible (maladie) ou résistante (reconnaissance et élimination).

- Les plantes cultivées réagissent aux agressions parasitaires par des synthèses coordonnées de barrières mécaniques
- et physiologiques dont les phytoalexines. Ces substances antibiotiques -près de 200 décrites- sont des inhibiteurs multisites, de grande diversité. structurale, souvent à action synergique bien qu'à spectre limité. Certaines phytoalexines sont
- détoxifiées par des agents pathogènes

1-1 Les substances préformées

(ou défenses constitutives)

C'est des barrières chimiques et physiques présentes dans la plante avant toute agression. Elles constituent la première ligne de défense passive contre les pathogènes et les herbivores.

Contrairement aux défenses induites qui consomment de l'énergie uniquement lors d'une attaque, ces substances représentent un investissement permanent pour la plante.

1.1-1 Barrières Physiques (Structurelles)

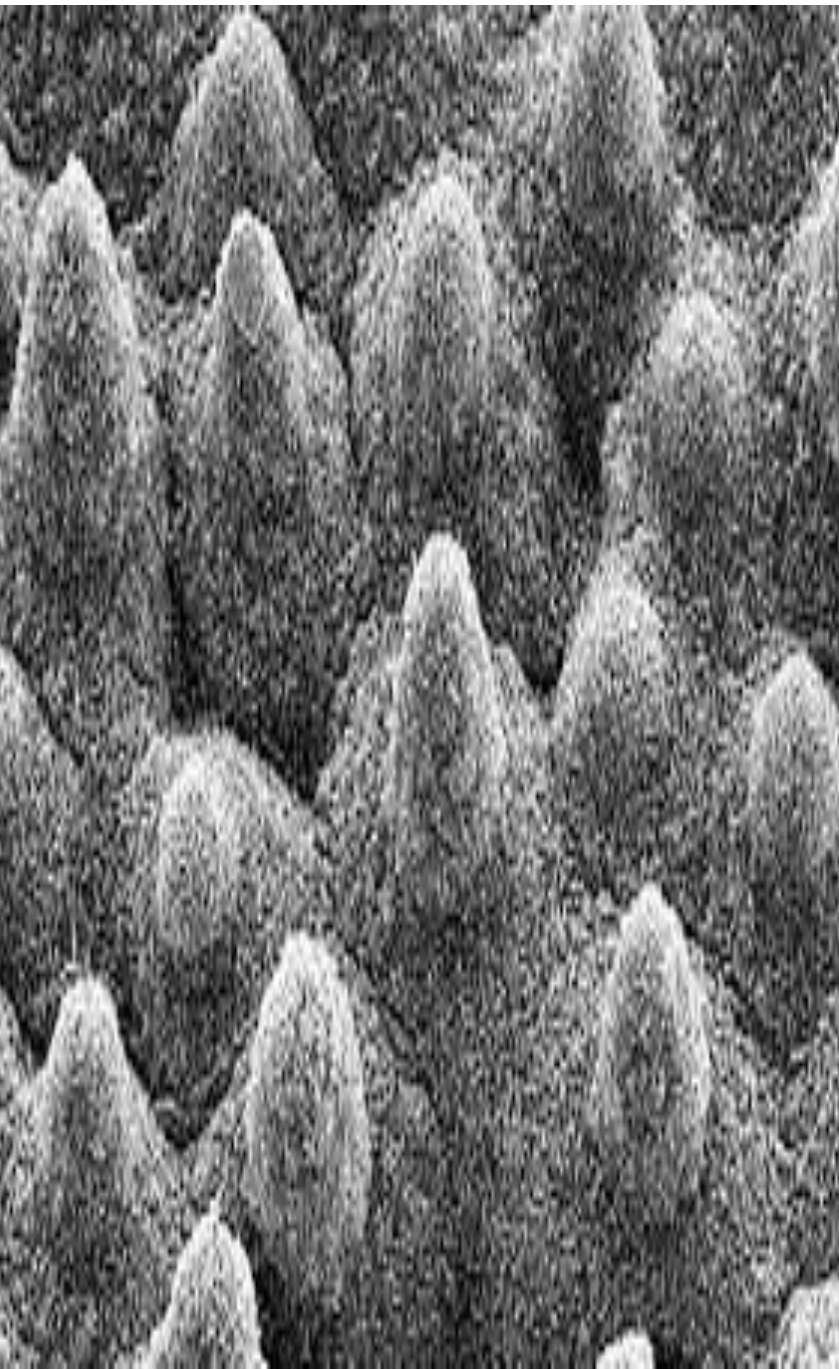
Ces structures empêchent physiquement l'entrée des micro-organismes :

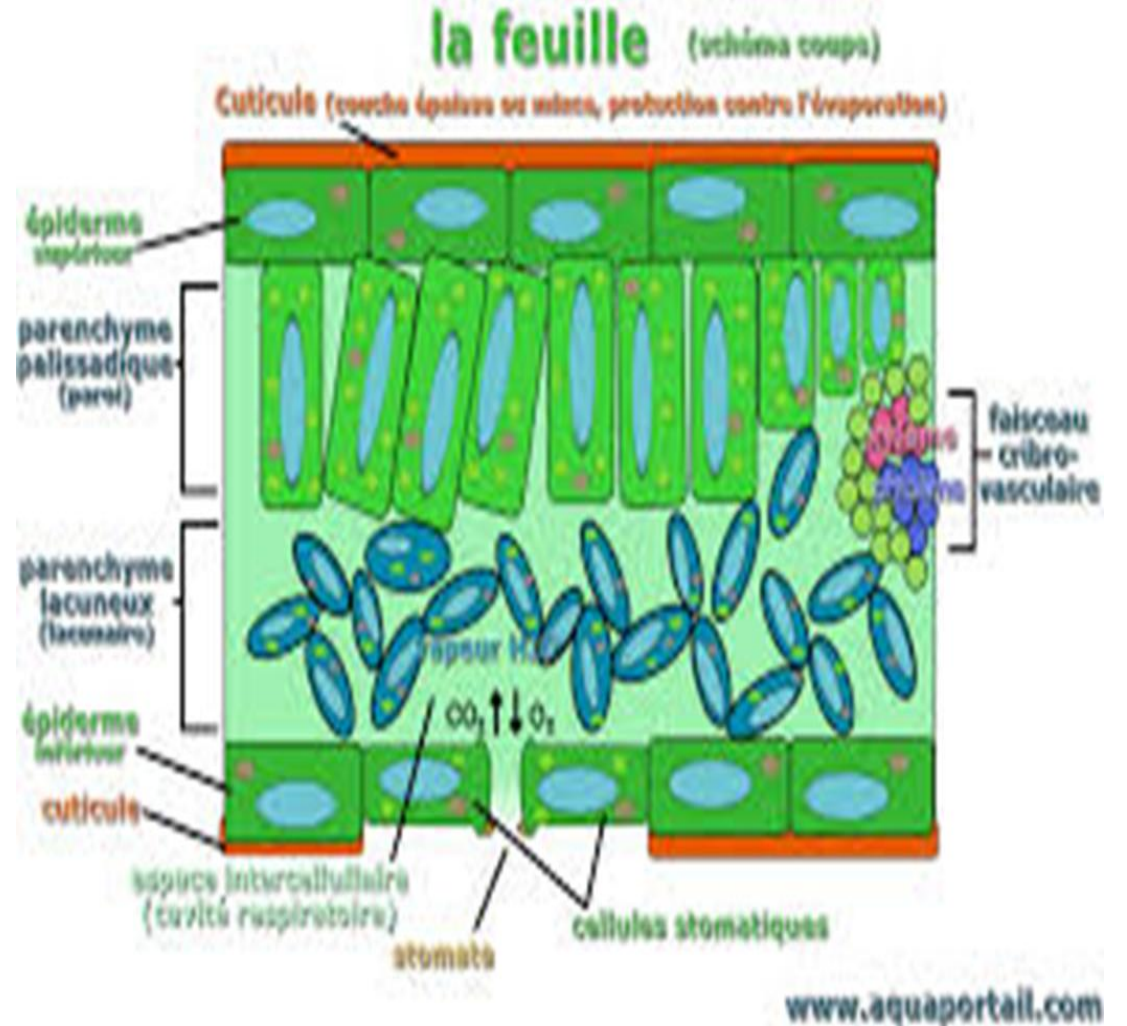
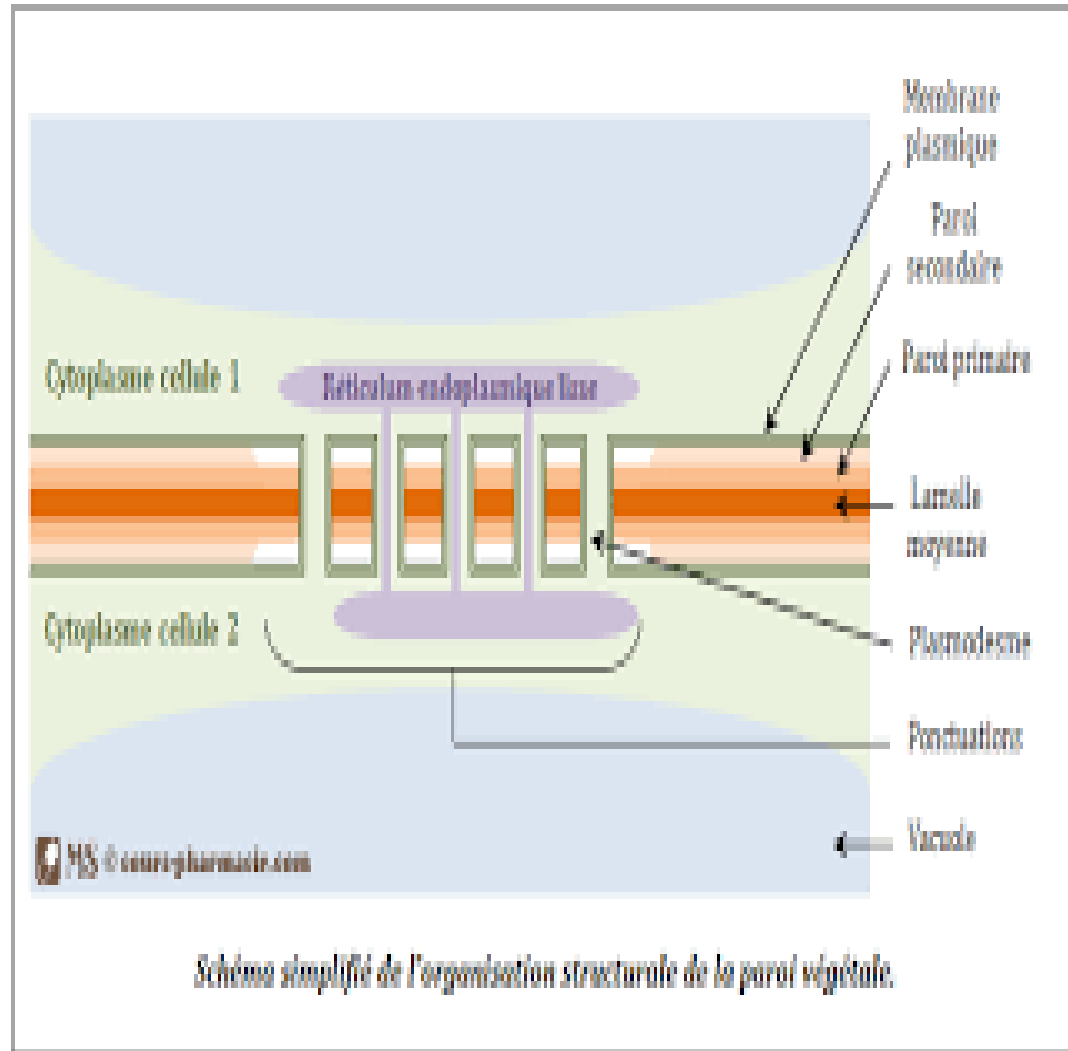
Cuticule cireuse : Recouvre l'épiderme des feuilles pour limiter l'adhérence de l'eau et des spores fongiques.

Parois cellulaires : Composées de cellulose, pectine et parfois de lignine ou de subérine, elles forment une armature rigide difficile à percer.

Trichomes (poils) : Peuvent être de simples obstacles mécaniques ou porter des glandes sécrétant des substances collantes ou toxiques.

Épines et aiguillons : Protègent principalement contre les grands herbivores









1-1.2- Barrières Chimiques (Phytoanticipines)

Ces molécules toxiques sont stockées dans les cellules (souvent dans les vacuoles) ou excrétées à la surface :

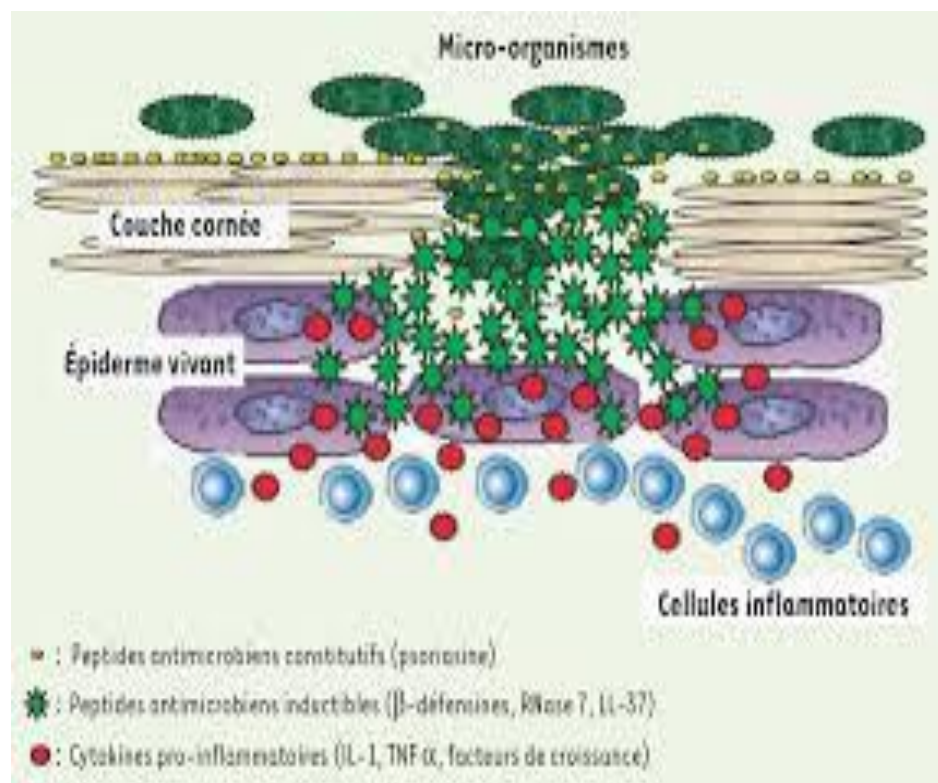
Composés phénoliques : Comme les tanins, qui inhibent les enzymes digestives des insectes, ou l'acide catéchol présent dans les écailles d'oignon.

Saponines : Des détergents naturels qui détruisent les membranes cellulaires des champignons (ex: dans l'avoine ou la tomate).

Alcaloïdes : Substances très toxiques comme la nicotine, la caféine ou la morphine qui perturbent le système nerveux des prédateurs.

Glucosinolates : Caractéristiques des Brassicacées (moutarde, colza), ils libèrent des substances irritantes lorsqu'ils sont broyés.

Peptides de défense : Comme les thionines ou les défensines, qui ont une activité antimicrobienne directe.



1-1-3. Excrétions protectrices

- **Résines et latex** : Substances visqueuses capables d'engluer les insectes ou de sceller rapidement une plaie.
- **Acide formique** : Présent notamment dans les poils urticants de l'ortie pour repousser les brouteurs



Les résines naturelles - une
richesse issue du monde végétal



2- Prédiposition

La prédiposition désigne l'état de vulnérabilité d'une plante face à une maladie ou un agresseur, résultant de facteurs qui agissent avant l'infection.

Contrairement à la résistance (qui est génétique), la prédiposition est souvent induite par des stress extérieurs qui affaiblissent les barrières naturelles de la plante.

2-1. Facteurs Environnementaux (Stress Abiotiques)

Ce sont les causes les plus fréquentes de prédisposition. Des conditions non optimales perturbent le métabolisme de la plante :

Stress hydrique : Un manque d'eau (sécheresse) ou un excès (inondation) affaiblit les tissus et facilite la pénétration des pathogènes.

Températures extrêmes : Le gel ou les fortes chaleurs peuvent créer des micro-lésions ou ralentir les réponses immunitaires.

Déséquilibre nutritionnel : Une carence (ex: manque de potassium) ou un excès (ex: trop d'azote) rend les tissus plus tendres et plus attractifs pour les pucerons ou les champignons.

Lumière et humidité : Un manque de lumière réduit la photosynthèse et donc l'énergie disponible pour la défense, tandis qu'une humidité stagnante favorise la germination des spores.

2- 2. Facteurs Génétiques

La structure même de la plante peut la prédisposer à certaines attaques :

Sensibilité variétale : Certaines variétés n'ont pas les gènes de reconnaissance (récepteurs) nécessaires pour détecter un pathogène spécifique.

Morphologie : Des feuilles très fines, une cuticule peu épaisse ou des stomates restant largement ouverts sont des "portes d'entrée" naturelles

2- 3. Facteurs Humains et Cultureux

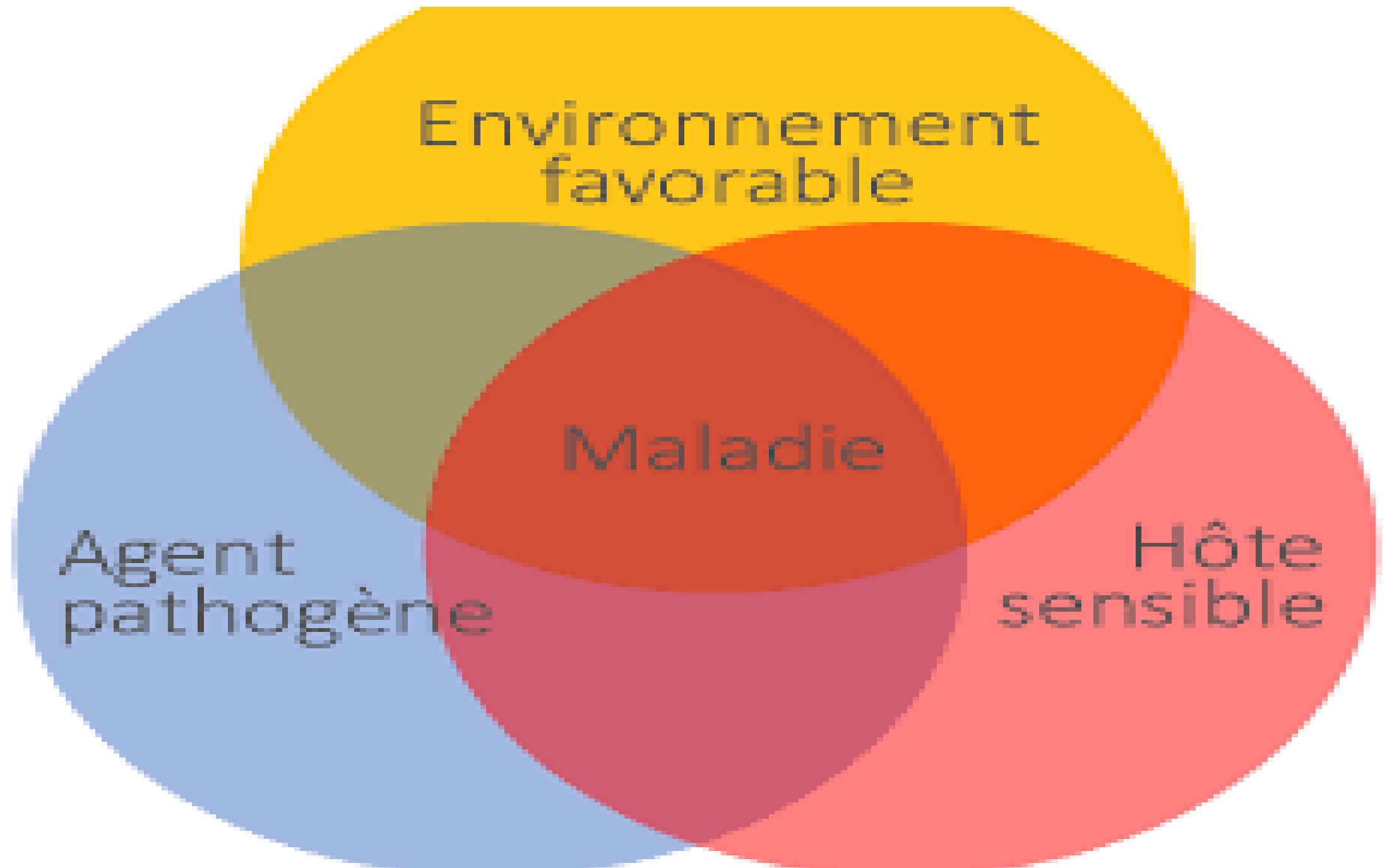
Blessures mécaniques : La taille, le greffage ou les dégâts de grêle créent des plaies qui prédisposent la plante à des infections bactériennes.

Monoculture : La densité de plantes identiques facilite la propagation rapide des maladies, augmentant la pression parasitaire sur chaque individu.

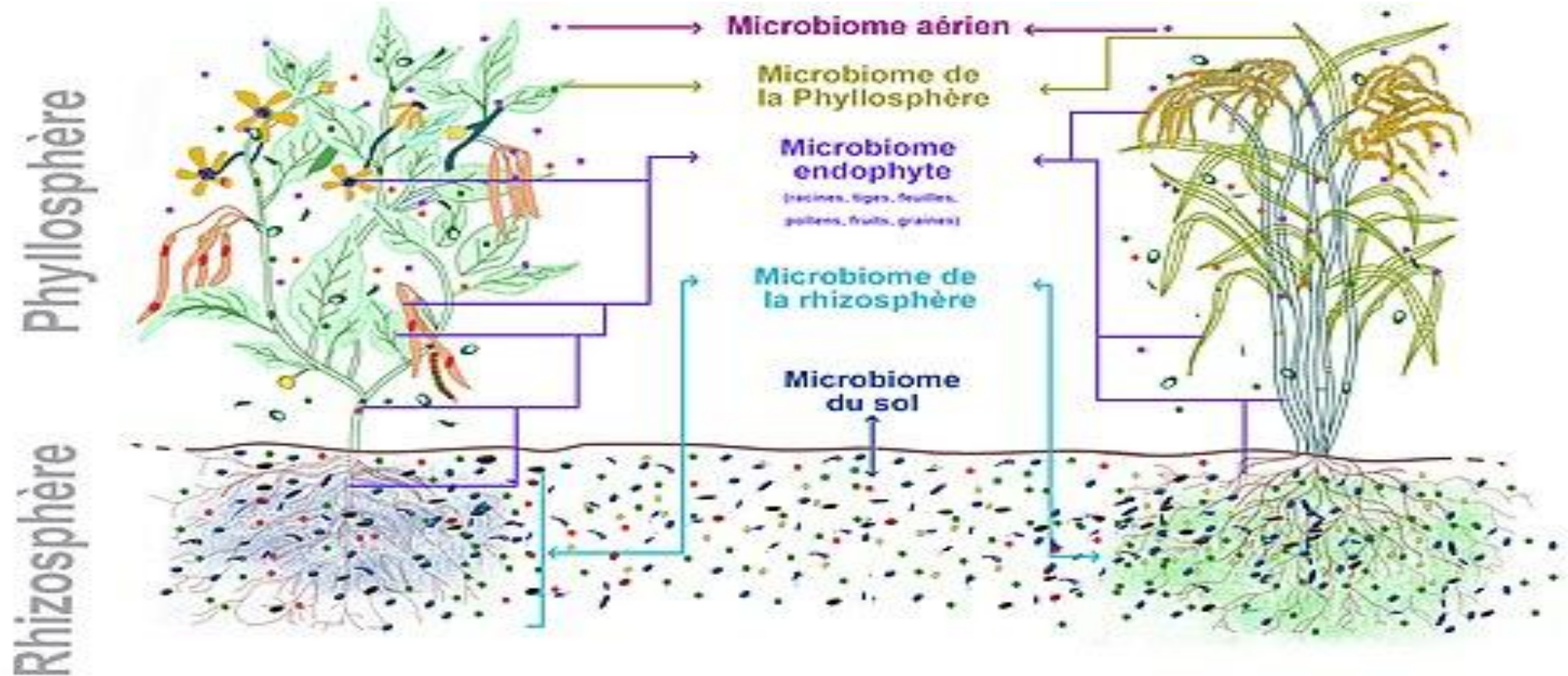
Le "Triangle des Maladies"

En phytopathologie, on considère qu'une maladie ne se développe que si trois conditions sont réunies simultanément :

- ✓ **Un hôte réceptif** (prédisposé).
- ✓ **Un agent pathogène virulent.**
- ✓ **Un environnement favorable** au pathogène



Le microbiote des plantes, appelé aussi phytobiotte, est le microbiote constitué de la communauté de micro-organismes bactériens et fongiques plus ou moins mutualistes ou symbiotiques, associée à la plupart des plante



3- Mécanismes de défense

Les mécanismes de défense des plantes se divisent en deux grandes catégories : les défenses constitutives (toujours présentes) et les défenses induites (activées après une attaque) nous avons :

- Moyens structuraux
- Moyens biochimiques

Moyens structuraux

3-1. Les Défenses Constitutives (Passives)

Ce sont les barrières préexistantes qui servent de première ligne de protection.

La cuticule cireuse des feuilles, les parois cellulaires épaisses, les épines et les trichomes (poils) qui gênent le mouvement ou l'alimentation des insectes.

3-1-1. Les barrières de surface (L'armure)

La Cuticule : Une couche cireuse hydrophobe qui recouvre l'épiderme.

Rôle : Elle empêche l'eau de stagner sur la feuille (limitant la germination des spores de champignons) et constitue une barrière physique difficile à percer.

Les Trichomes (Poils) :

Rôles : Ils gênent le déplacement des insectes, limitent l'accès à la surface de l'épiderme et peuvent parfois sécréter des substances collantes ou toxiques.

Les Cires épicuticulaires : Elles rendent la surface glissante pour les insectes et créent un environnement chimique défavorable aux bactéries.

3-1-2. Les structures protectrices spécifiques

Certaines plantes développent des structures morphologiques dédiées à la défense

Structure	Description et fonction
Épines et Aiguillons	Protections macroscopiques contre les grands herbivores (mammifères).
Sclérenchyme	Tissus composés de cellules à parois très épaisses qui protègent les vaisseaux conducteurs (sève).
Stomates "étroits"	La morphologie ou le nombre de stomates (pores respiratoires) peut limiter l'entrée des bactéries qui les utilisent comme "portes ouvertes".

3-1-3. Le rôle de l'anatomie interne

L'organisation des tissus joue aussi un rôle crucial :

- **L'Endoderme** : Dans les racines, cette couche de cellules agit comme un filtre sélectif et une barrière physique contre les pathogènes du sol.
- **Les canaux sécréteurs** : Présence de canaux à résine (conifères) ou de tubes lactifères (latex) qui, sous la pression structurale, expulsent une substance collante dès qu'une entaille est faite, emprisonnant l'intrus.

3- 2. La Réponse Immunitaire Innée

Une fois l'intrus détecté, la plante active deux niveaux de défense :

- L'immunité basale (PTI) Pattern-Triggered Immunity : Une réponse légère qui limite la propagation.
- L'immunité spécifique (ETI) (Effector-Triggered Immunity)
- : Si le pathogène contourne la première barrière, la plante reconnaît des protéines spécifiques de l'assaillant (effecteurs). Cela déclenche une réaction beaucoup plus violente.

2. Les Défenses Induites (Actives)

Elles sont déclenchées uniquement lorsque la plante détecte un envahisseur, ce qui lui permet d'économiser de l'énergie en temps normal.

2- 1. La reconnaissance : **Le système d'alerte**

La plante possède des récepteurs à la surface de ses cellules qui détectent des signaux spécifiques :

- PAMPs (Pathogen-Associated Molecular Patterns) : Ce sont des signatures génériques de l'envahisseur (ex: la flagelline d'une bactérie).
- DAMPs (Damage-Associated Molecular Patterns) : Des molécules libérées par la plante elle-même lorsqu'elle est blessée.

3- Réponses locales

3-1 Réaction d'hypersensibilité (HR) : Suicide cellulaire programmé au point d'infection pour isoler et affamer le pathogène.

3-2 Renforcement structural : Dépôt de lignine ou de subérine pour durcir les parois cellulaires autour de l'attaque.

3-3 Réponses systémiques : Production d'hormones (acide salicylique, jasmonate) qui voyagent dans toute la plante pour préparer les feuilles saines à une éventuelle attaque

3. Les mécanismes de défense actifs

Pour stopper l'invasion, la plante déploie un arsenal varié :

Type de défense	Action concrète
Physique	Renforcement de la paroi cellulaire (dépôt de lignine ou de callose) pour bloquer l'entrée.
Chimique	Production de phytoalexines (antibiotiques naturels) et d'enzymes qui dégradent la paroi des champignons.
Oxydative	"Explosion" de dérivés réactifs de l'oxygène (H ₂ O ₂) qui sont toxiques pour le microbe
La Réaction Hypersensible (HR)	C'est le "suicide cellulaire" localisé : la plante fait mourir les cellules entourant le site d'infection pour affamer le pathogène.

4. La communication systémique (SAR)

- La plante ne se contente pas de défendre la zone infectée. Elle envoie un signal d'alarme chimique (souvent via l'acide salicylique) à toutes les parties saines.
- C'est ce qu'on appelle la Résistance Systémique Acquise (SAR). La plante entière se met en état d'alerte, prête à réagir beaucoup plus vite si une autre feuille est attaquée.
- L'équilibre de cette réaction est délicat. Si la plante se défend trop fort, elle épuise son énergie et ne grandit plus. Si elle ne réagit pas assez, elle meurt.

Chapitre III : Génétique de la résistance

I Définition de la résistance

La résistance des plantes est la capacité héréditaire d'une plante à limiter ou empêcher le développement d'un agent pathogène (champignons, bactéries, virus, insectes)

Elle dépend de **gènes de résistance (R)** présents dans le génome de la plante.

II, Types de résistance

1. Résistance non-hôte

Toute une espèce est résistante à un pathogène.

Mécanismes :

Défenses **passives (barrières physiques)**

Défenses **inductibles (réactions actives)**

2. Résistance spécifique (hôte-pathogène)

- **Interaction gène pour gène**
- Gène R (plante) \leftrightarrow gène Avr (pathogène)
 - Si reconnaissance \rightarrow résistance
 - Sinon \rightarrow maladie
- **Types :**
- Résistance dominante
- Résistance récessive
- Avec ou sans réaction hypersensible

3. Mécanismes moléculaires de résistance

Étapes principales :

1.Reconnaissance du pathogène

1. Récepteurs membranaires (PRR)
2. Protéines R

2.Transduction du signal

1. Cascade de signalisation
2. Production de molécules (Ca^{2+} , ROS...)

3.Réponses de défense

1. Production de phytoalexines
2. Renforcement de la paroi
3. Réaction hypersensible (mort cellulaire locale)

4. Types de résistance génétique

- **Résistance qualitative**
 - Contrôlée par **un seul gène majeur**
 - Forte mais spécifique
 - Facilement contournée par le pathogène
- **Résistance quantitative**
 - Contrôlée par plusieurs gènes (QTL)
 - Faible mais **durable**
 - Plus stable dans le temps

5- Résistance (ou sensibilité) en fonction de l'âge des plantes

La résistance liée à l'âge (appelée aussi *résistance ontogénique*) correspond au fait que le niveau de résistance d'une plante varie au cours de son développement.

Une plante peut être :

- sensible au stade jeune
- mais devenir résistante à l'âge adulte

Types de variations

1. Résistance accrue avec l'âge

- Très fréquente
- Les jeunes tissus sont **plus vulnérables**
- Les plantes adultes développent :
 - parois cellulaires plus épaisses
 - accumulation de composés de défense
 - meilleure activation des gènes R

2. Sensibilité accrue avec l'âge

- Plus rare
- Les tissus âgés peuvent :
 - perdre leur capacité de défense
 - accumuler des facteurs favorables aux pathogènes

Facteurs impliqués :

1. Expression des gènes

- Les **gènes de résistance (R)** peuvent être :
 - peu exprimés chez les jeunes plants
 - activés à maturité

• **2. Changements structuraux**

- Cuticule plus épaisse
- Lignification des parois

• **3. Métabolisme secondaire**

- Production de :
 - phytoalexines
 - composés phénoliques

• **4. Hormones végétales**

- Acide salicylique
- Jasmonates

6- Résistance des plantes en fonction de la nutrition

La **nutrition minérale** joue un rôle essentiel dans la **résistance ou la sensibilité des plantes aux maladies et aux ravageurs**. Un déséquilibre nutritionnel peut **affaiblir** ou au contraire **renforcer** les mécanismes de défense.

1. Effet des éléments minéraux

1. Azote (N)

- Favorise la croissance rapide
- Excès → tissus tendres → **sensibilité accrue**
- Carence → plante affaiblie

2. Potassium (K)

Élément clé de la résistance renforce :

- la paroi cellulaire
- la régulation hydrique

Améliore la résistance aux :

- champignons
- stress

3. Phosphore (P)

- Stimule :le développement racinaire
la vigueur générale

Aide la plante à **mieux tolérer les infections**

4. Calcium (Ca)

- Renforce les parois cellulaires
- Diminue la pénétration des pathogènes

Important contre :

- maladies de conservation
- pourritures

5. Oligo-éléments (Fe, Zn, Mn...)

Interviennent dans :

- les enzymes de défense
- la synthèse des composés antimicrobiens
- Carence = baisse de résistance

6 Déséquilibres nutritionnels

Deux cas dangereux :

✘ Excès

- Azote élevé → maladies foliaires
- Déséquilibre ionique

✘ Carence

- Faible croissance
- Défenses réduites

6. Bases génétiques

- **Variabilité génétique**
 - Mutations
 - Hybridation
 - Recombinaison

7. Amélioration génétique de la résistance

- **Méthodes classiques**

- ✓ Sélection variétale
- ✓ Croisements (hybridation)
- ✓ Introgression de gènes

- **Méthodes modernes**

- ✓ Marqueurs moléculaires (MAS)
- ✓ Cartographie génétique
- ✓ Transgénèse (ex : gènes Bt contre insectes)

8. Résistance aux différents agents

- **Maladies**
 - Champignons
 - Bactéries
 - Virus

- **Ravageurs (insectes)**
 - Production de toxines naturelles
 - Modification du métabolisme de la plante

Chapitre III : Bio transmission des maladies par les principaux ravageurs des plants

La **biotransmission des maladies** par les ravageurs des plantes correspond au processus par lequel certains organismes nuisibles (principalement des insectes, mais aussi des nématodes ou acariens) transmettent des agents pathogènes (virus, bactéries, phytoplasmes, champignons) d'une plante à une autre.

1. Principaux ravageurs vecteurs

Les ravageurs impliqués sont surtout des insectes piqueurs-suceurs :

- **Pucerons (Aphididae)** : très importants vecteurs de virus.
- **Aleurodes (Aleyrodoidea) (mouches blanches)** : transmettent de nombreux virus tropicaux.
- **Cicadelles (Cicadellidae)** : vecteurs de phytoplasmes et bactéries.
- **Thrips (Thysanoptera)** : transmettent certains virus.
- **Nématodes phytoparasites** : vecteurs de virus du sol.
- **Acariens** : parfois vecteurs de virus.

1.1 Principaux vecteurs de maladies fongiques

Les maladies causées par les champignons (ex : Fusariose, Oïdium, Mildiou) sont généralement transmises par :

- le vent
- l'eau

Mais certains **ravageurs** interviennent comme **vecteurs secondaires**, en facilitant ou assurant la dissémination.

2. Types de ravageurs vecteurs

A/ Insectes

1. **Coléoptères (ex : scolytes)**

Vecteurs les plus importants pour les champignons du bois

Transport actif de spores dans leurs galeries

Exemple : Scolytes ↔ champignons responsables de maladies vasculaires des arbres

2. **Diptères (mouches)**

Transport passif de spores

Contamination des tissus végétaux

• **3. Fourmis Formicidae**

Déplacement de spores dans le sol

Rôle indirect dans la dissémination

4. Insectes piqueurs-suceurs

(ex : pucerons, cicadelles)

Rôle indirect :

Création de blessures

Excrétion de miellat → développement de champignons (fumagine)

B/ Nématodes phytoparasites

Endommagent les racines

Facilitent l'entrée des champignons

Exemple classique :

Interaction entre nématodes et Fusariose

Effet synergique très important en agriculture

C. Autres vecteurs biologiques

1. Animaux (bétail, faune sauvage)

Transport de spores via :

poils

sabots

2. Activité humaine

Outils agricoles contaminés

Machines

semences infectées

1, 2. Principaux vecteurs de maladies bactériennes et phytoplasmoses

Les maladies causées par les bactéries (ex : *Xylella fastidiosa*) et les phytoplasmes (ex : Jaunisse de la vigne) dépendent fortement de **vecteurs biologiques**, contrairement aux champignons.

2. Principaux vecteurs

A. Insectes piqueurs-suceurs (vecteurs majeurs)

Ce sont les vecteurs **les plus importants et spécifiques**

Cicadelles (Cicadellidae)

Principaux vecteurs de phytoplasmes

Transmission persistante (souvent propagative)

Exemple : Flavescence dorée

Flavescence dorée



La cicadelle de la flavescence



Psylles (Psyllidae)

Vecteurs de phytoplasmes et bactéries

Exemple : Transmission de maladies des agrumes

◆ Aleurodes (mouches blanches)

Vecteurs secondaires

Rôle plus limité pour bactéries

- **Pucerons**
- Rôle faible pour bactéries
- Plus importants pour virus (à ne pas confondre)

Psylles (Psyllidae)



Aleurodes (mouches blanches)



Pucerons



B. Cas spécifique : vecteurs de bactéries xylémiques

Cercopes (spittlebugs)

Vecteurs clés de : *Xylella fastidiosa*

Exemple : Syndrome de dépérissement rapide de l'olivier

Xylella fastidiosa



1-3. Principaux vecteurs de maladies virales

Principaux groupes de vecteurs

A. Insectes (les plus importants)

1. Pucerons (Aphididae)

Ex : *Myzus persicae*, *Aphis gossypii*

Mode de transmission :

Non persistante (rapide, quelques secondes)

Persistante circulative

Exemples de virus :

Virus de la mosaïque du concombre (CMV)

Virus de la jaunisse de la betterave

Ce sont les vecteurs les plus fréquents et les plus étudiés.

Myzus persicae



Aphis gossypii



2. Aleurodes (mouches blanches)

Ex : *Bemisia tabaci*, *Trialeurodes vaporariorum*

Transmission persistante circulative

Virus transmis :

Begomovirus (ex : virus de la tomate TYLCV)

Bemisia tabaci



Trialeurodes vaporariorum



3. Cicadelles (Cicadellidae)

Transmission persistante propagative

Virus transmis :

Virus de la jaunisse nanisante de l'orge

4. Thrips

Ex : *Frankliniella occidentalis*

Transmission propagative

Virus transmis :

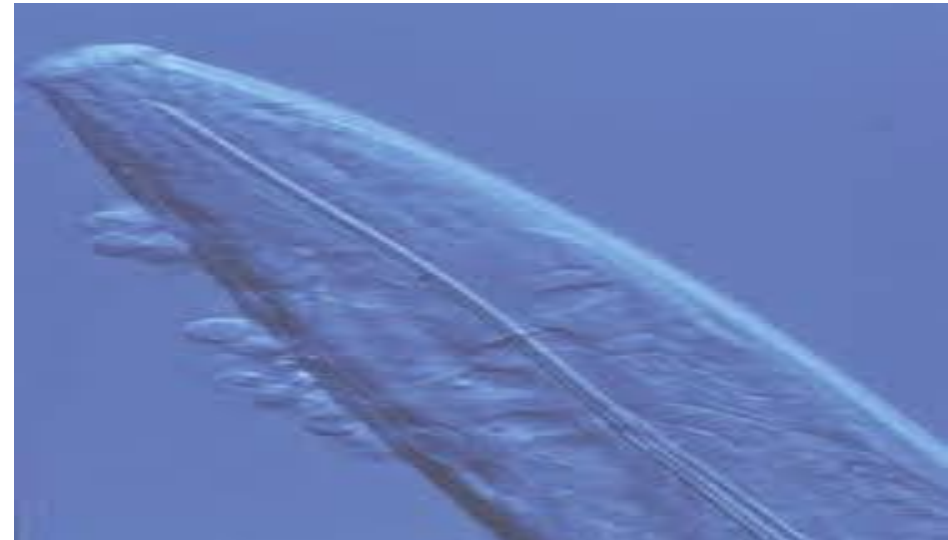
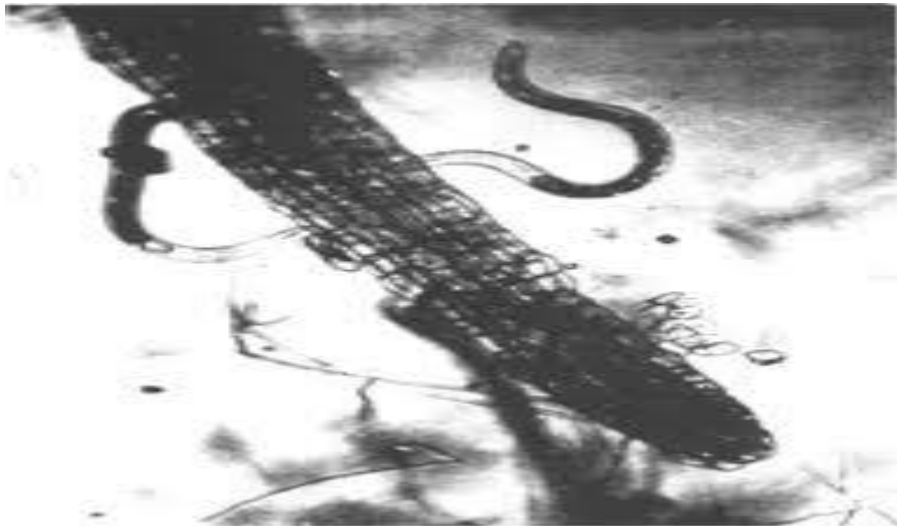
Tospovirus (ex : virus de la flétrissure tachetée de la tomate – TSWV)

Frankliniella occidentalis



B. Nématodes

- Genres : *Xiphinema*, *Longidorus* Transmission :
Persistante (virus fixés sur le stylet)
- Virus transmis :
Nepovirus (ex : virus du court-noué de la vigne)

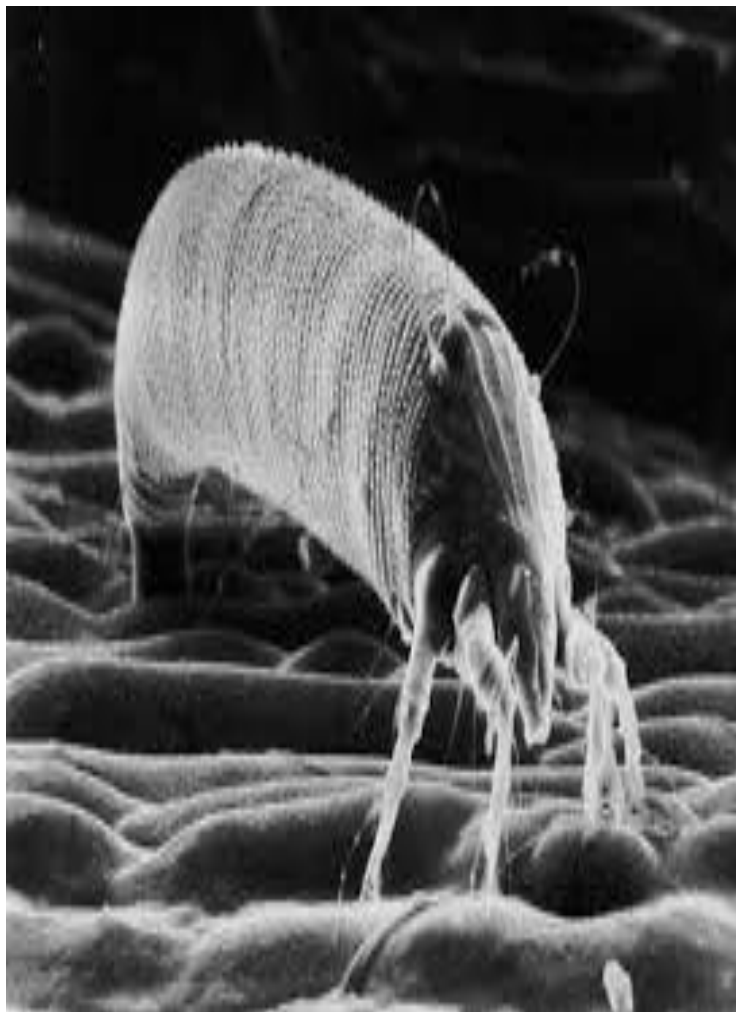


D. Acariens

Ex : *Aceria tosichella*

Transmission : Persistante

Virus transmis : Virus de la mosaïque striée du blé



Types de transmission virale

1. Non persistante

- Acquisition rapide (secondes)
- Virus reste sur le stylet
- Transmission immédiate Ex : pucerons

2. Semi-persistante

- Acquisition plus longue
- Virus reste dans le tube digestif

3. Persistante

a. Circulative

- Virus circule dans l'hémolymphe
- Ne se multiplie pas dans le vecteur

b. Propagative

- Virus se multiplie dans le vecteur
- Transmission durable

1- 4. Facteurs de bio transmission.

1/ Définition de la bio-transmission

La bio-transmission correspond à la **transmission des virus par un vecteur vivant** (insecte, nématode, acarien, champignon), impliquant des interactions biologiques entre :

le virus

le vecteur

la plante hôte

2. Facteurs liés au vecteur

A. Espèce et biotype du vecteur

Certains vecteurs sont **spécifiques d'un virus**

Exemple : *Bemisia tabaci* transmet surtout les begomovirus

B. Comportement alimentaire

Piqueur-suceur → facilite l'inoculation

Fréquence des piqûres → augmente la transmission

C. Mobilité et dispersion

Plus le vecteur est mobile, plus la propagation est rapide

D. Capacité vectorielle

Aptitude à acquérir, conserver et transmettre le virus

Dépend :

du temps d'acquisition

du temps d'inoculation

E. Stade de développement

Certains virus sont acquis uniquement au stade larvaire (ex : thrips)

2. Facteurs liés au vecteur

A. Espèce et biotype du vecteur

- Certains vecteurs sont **spécifiques d'un virus**
- Exemple : *Bemisia tabaci* transmet surtout les begomovirus

B. Comportement alimentaire

Piqueur-suceur → facilite l'inoculation

Fréquence des piqûres → augmente la transmission

C. Mobilité et dispersion

Plus le vecteur est mobile, plus la propagation est rapide

D. Capacité vectorielle

Aptitude à acquérir, conserver et transmettre le virus

Dépend :

du temps d'acquisition

du temps d'inoculation

E. Stade de développement

Certains virus sont acquis uniquement au stade larvaire (ex : thrips)

Travaux pratiques 1

Ce TP vise à identifier les symptômes de maladies (taches, flétrissement, nécroses) ou d'attaques de ravageurs et à observer les réactions de défense des plantes, notamment la réponse hypersensible (nécroses localisées pour isoler le pathogène) et les défenses structurelles (épines, poils). L'analyse repose sur une inspection minutieuse (feuilles, tiges) pour diagnostiquer le stress biotique ou abiotique.

I. Observation des Symptômes (Désordres)

-Signes foliaires : Taches brunes/noires (nécroses), jaunissement (chlorose), feutrage blanc (oidium), déformations.

-Signes de flétrissement : Perte de turgescence, souvent liée à un stress hydrique ou racinaire.

-Dégâts de ravageurs : Trous, galeries, feuilles enroulées, présence de sécrétions.

II. Réactions de Défense des Plantes

-Défenses passives (constitutives) : Barrières physiques comme la cuticule, des épines ou des poils urticants.

-Défenses actives (induites) :

-Réaction hypersensible (RH) : La plante sacrifie rapidement des cellules autour du site d'infection pour bloquer l'envahisseur, créant une petite nécrose localisée.

-Renforcement structural : Lignification ou dépôt de callose pour renforcer les parois cellulaires.

- Réponses chimiques : Production de composés toxiques (phytoalexines) ou de protéines de défense