

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة باجي مختار - عنابة

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



كلية العلوم

FACULTE DES SCIENCES

قسم البيولوجيا

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE

Polycopié du Cours de :

Phytopathologie

*Destiné aux étudiants de Master I de la filière Biotechnologies, spécialité
Biotechnologie végétale*

Réalisé par :

Dr. ATTAB Saliha

2018-2026

Préambule

En raison de l'impact économique considérable des pertes agricoles dues aux agents phytopathogènes, il est essentiel de disposer d'une formation solide en phytopathologie, appuyée par des connaissances approfondies en mycologie, bactériologie et virologie. En effet, les maladies des plantes constituent un facteur limitant majeur de la production agricole, affectant à la fois le rendement et la qualité des cultures.

Il est également indispensable de posséder des bases en biologie végétale, en microbiologie et en écologie, afin de mieux comprendre les mécanismes d'infection, les interactions entre l'hôte et le pathogène, ainsi que les facteurs environnementaux influençant le développement des maladies. Ces connaissances permettent d'appréhender l'évolution des maladies et de mettre en œuvre des stratégies de lutte adaptées, durables et efficaces.

Ainsi, la phytopathologie s'inscrit comme une discipline essentielle des sciences agronomiques, contribuant à la protection des cultures et à la sécurité alimentaire.

Ce module vise à permettre aux étudiants de comprendre les bases de la phytopathologie, d'identifier certaines maladies des plantes selon les différentes techniques d'observation et d'expérimentation, d'analyser les interactions hôte–pathogène–environnement, d'établir un diagnostic fiable et de mettre en œuvre des stratégies de lutte adaptées et durables.

List des figures

Figure 1 : La fête agricole Robigalia en l'honneur de Robigus	4
Figure 2 : Modifications de couleur	6
Figure 3 : Altérations d'organes	7
Figure 4 : Déformations	11
Figure 5 : Anomalies de croissance.....	11
Figure 6 : Répartition de la maladie au niveau de la culture	12
Figure 7 : Quelques causes des maladies physiologiques	17
Figure 8 : Symptômes liés aux principales carences en minéraux	18
Figure 9 : Cycle de reproduction d'un virus.....	20
Figure 10 : Forme et architecture de quelques genres de phytovirus	20
Figure 11 : Schéma générale d'une bactérie	21
Figure 12: Différentes formes de bactérie	22
Figure 13 : Reproduction des bactéries par scissiparité	23
Figure 14 : Feu bactérien sur poirier avec exsudat visible	24
Figure 15 : Filaments fongiques	25
Figure 16 : Cycles de reproduction sexuée et asexuée de <i>Puccinia striiformis</i>	26
Figure 17 : Schéma d'un nématode parasite	27
Figure 18 : Cycle de vie des nématodes	28
Figure 19 : Carotte attaquée par les nématodes.....	28
Figure 20 : Exemples d'insectes nuisibles	30
Figure 21 : Cycle biologique du Puceron du soja	30
Figure 22 : Exemples de plantes parasites.....	32
Figure 23 : Exemples de mauvaises herbes.....	34
Figure 24 : Triangle de la maladie.....	35
Figure 25 : Schéma d'une maladie polycyclique	36
Figure 26 : Cycle infectieux de base d'un champignon pathogène	37
Figure 27 : Relations compatible et incompatible.....	39
Figure 28 : Relation gène pour gène	40
Figure 29 : Étapes de la défense active	43
Figure 30 : Schéma des différentes formes de ROS.....	45

Figure 31 : Schématisation des mécanismes de phosphorylation/déphosphorylation.	46
Figure 32 : Réaction hypersensible (HR)	47
Figure 33 : Localisation de la HR, la LAR et la SAR	48
Figure 34 : Représentation schématique d'un champignon pathogène, dont la tentative de pénétration échoue grâce à un dépôt de callose au niveau de la paroi végétale.	49
Figure 35 : Rotation des cultures	53
Figure 36 : Gestion de l'irrigation et des engrais	54
Figure 37 : Polyculture	54
Figure 38 : La sélection classique	55
Figure 39 : La transgénèse.....	56
Figure 40 : Utilisation du parasitoïde <i>Aphidius colemani</i> contre les pucerons	58
Figure 41 : Utilisation de la coccinelle contre les pucerons	58
Figure 42 : Utilisation du <i>Bacillus thuringiensis</i> Berliner (a) contre la chenille du bombyx <i>disparate</i> (<i>Lymantria dispar</i> Linnaeus)	59
Figure 43 : Utilisation des produits phytosanitaires	60

Contenu de la matière

1ère partie : INTRODUCTION

1. concepts généraux

2ème partie : L'ETIOLOGIE

2.1. Les maladies physiologiques

2.2. Les maladies dues à des agents phytopathogènes

2.2.1. Les champignons

2.2.2. Les bactéries

2.2.3. Les virus

2.2.4. Les mauvaises herbes

3ème partie : LES FACTEURS DE DEVELOPPEMENT ET LE DIAGNOSTIC

3.1. Les relations hôte-pathogène

3.3. Le diagnostic : Détection et identification des agents phytopathogènes

4ème partie : LES METHODES DE LUTTE

4.1. Les aspects légaux de la lutte contre les maladies des plantes

4.2. Les pratiques culturales et leurs effets sur les maladies des plantes

4.3. L'amélioration génétique de la résistance aux agents phytopathogènes

4.4. La lutte biologique en phytopathologie

4.5. La lutte chimique en phytopathologie

Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre I : Les maladies des plantes : Concepts généraux	3
Objectifs	3
1. Définition de la phytopathologie	3
2. Bref historique de la phytopathologie	3
2. Symptomatologie	4
2.1. Modifications de couleur	4
2.2. Altérations d'organes	5
2.3. Déformations	8
2.4. Anomalies de croissance	11
2.5. Identification des symptômes (diagnostic)	12
2.6. Remarque	13
Chapitre II : L'Étiologie	14
Objectifs	14
1. Définition.....	14
2. Les différents types de maladies	14
2.1. Les maladies physiologiques ou abiotiques	14
2.1.1. Définition	14
2.1.2. Caractéristiques des maladies physiologiques	14
2.1.3. Causes des maladies physiologiques	15
2.1.4. Symptômes liés aux maladies physiologiques	17
2.2. Les maladies parasitaires (= infectieuses ou biotiques)	19
2.2.1. Définition	19
2.2.2. Les agents phytopathogènes	19
A. Les virus	19
B. Les bactéries	20
C. Les champignons	25
D. Les nématodes	27
E. Les insectes	28
F. Les plantes parasites	31
2.2.3. Le triangle de la maladie	34

2.2.4. Notion d'épidémiologie végétale	35
2.2.5. Cycle de développement de la maladie parasitaire	36
Chapitre III : Les facteurs de développement et le diagnostic	38
Objectifs	38
1. Les relations hôte-pathogène	38
1.1. Les types de relations hôte-pathogène	38
1.2. Les types de résistances selon Van der Plank	39
1.3. La relation gène pour gène (Théorie de Flor)	40
1.4. Les stratégies de défense chez les plantes	40
1.4.1. La défense passive (ou préformée)	41
1.4.2. La défense active	41
1.4.2.1. La reconnaissance	42
1.4.2.2. La signalisation	44
1.4.2.3. Les réactions de défense	47
2. Diagnostic : Détection et identification des agents phytopathogènes	50
2.1. L'observation	50
2.2. L'expérimentation	50
Chapitre IV : Les méthodes de lutte	52
Objectifs	52
1. Les aspects légaux de la lutte contre les maladies des plantes.....	52
2. Les pratiques culturales et leurs effets sur les maladies des plantes	52
3. L'amélioration génétique de la résistance aux agents phytopathogènes	55
4. La lutte biologique	56
4.1. Utilisation des auxiliaires	57
4.2. Utilisation des extraits végétaux	59
4.3. Les stimulateurs de défense naturelle (SDN)	59
5. La lutte chimique	60
Conclusion	61
Références bibliographiques.....	62

Introduction

La phytopathologie, ou pathologie végétale, est une discipline scientifique qui se consacre à l'étude des maladies affectant les plantes cultivées et spontanées. Elle a pour objectif d'identifier les causes des altérations observées chez les végétaux, d'en comprendre les mécanismes de développement et d'en évaluer les répercussions sur la croissance, la productivité et la qualité des récoltes.

Dans un contexte d'intensification agricole, de changements climatiques et de pression croissante sur les systèmes de production, l'étude des maladies végétales revêt une importance capitale. En effet, ces maladies constituent l'un des principaux facteurs limitant la productivité agricole à l'échelle mondiale, en provoquant des pertes quantitatives et qualitatives parfois considérables.

La phytopathologie ne se limite donc pas à la simple description des symptômes, mais englobe également l'analyse des interactions entre la plante, l'agent causal et le milieu, ainsi que l'élaboration de méthodes de diagnostic, de prévention et de lutte raisonnée. Elle occupe ainsi une place fondamentale dans les sciences agronomiques, en contribuant à la protection des cultures, à la sécurité alimentaire et à la durabilité des systèmes de production.

La phytopathologie est une discipline scientifique intimement liée à plusieurs autres sciences biologiques et agronomiques, en raison de la complexité des interactions entre la plante, l'agent pathogène et le milieu. Elle s'appuie sur la botanique pour la connaissance de la plante hôte, sur la microbiologie pour l'identification et l'étude des agents pathogènes, et sur la physiologie végétale pour comprendre les perturbations fonctionnelles induites par la maladie. Elle entretient également des liens étroits avec la génétique, la biochimie, l'écologie, la pédologie et l'agronomie, qui contribuent à l'analyse des mécanismes de résistance, des conditions favorables au développement des maladies et des stratégies de prévention et de lutte. Ainsi, la phytopathologie apparaît comme une science intégrative située au croisement de plusieurs disciplines fondamentales et appliquées.

Ce cours de phytopathologie est destiné aux étudiants de Master II de la filière Biotechnologie, spécialité Biotechnologie végétale. Il est structuré en quatre chapitres :

le premier présente les concepts généraux de la discipline ; le deuxième traite de l'étiologie des maladies des plantes, en distinguant les maladies physiologiques et celles causées par les

principaux agents phytopathogènes (champignons, bactéries, virus et mauvaises herbes) ; le troisième aborde les facteurs de développement des maladies, les relations hôte–pathogène ainsi que les méthodes de diagnostic ; enfin, le quatrième est consacré aux différentes stratégies de lutte, incluant les aspects légaux, les pratiques culturales, l'amélioration génétique ainsi que les méthodes biologiques et chimiques. Ce polycopié se termine par une conclusion et une liste des références bibliographiques.

Chapitre I : Les maladies des plantes : Concepts généraux

Objectifs :

Faire acquérir aux étudiants les notions de base de la phytopathologie, en définissant la discipline, en contextualisant son évolution historique, et en leur permettant d'observer et de classer les symptômes des maladies végétales de façon rigoureuse.

1. Définition de la phytopathologie :

Le mot phytopathologie vient du grec phyto (plante), pathos (maladie) et logos (science). Ainsi, la phytopathologie (= phytiairie ou pathologie végétale) peut être définie comme l'étude des maladies des plantes au cours de leur croissance, mais aussi les altérations des produits végétaux après leur récolte (Lepoivre, 2003).

Actuellement, la phytopathologie joue un rôle central dans le maintien d'une production végétale suffisante et de qualité. Elle se base essentiellement sur l'étude et la description des symptômes par lesquels se manifestent les maladies des plantes (symptomatologie), l'identification des causes des maladies (étiologie) et l'élaboration des méthodes et des moyens de lutte contre ces maladies.

2. Bref historique de la phytopathologie :

Dès son origine, l'agriculture créa des conditions favorables aux maladies des plantes cultivées. Comme les maladies des plantes ont toujours été associées à la vie des végétaux, les civilisations anciennes les attribuaient à des causes divines et envisageaient essentiellement, comme moyens de lutte, des incantations magiques ou des cérémonies religieuses destinées à apaiser les dieux. Ainsi, les Romains implorent le dieu **Robigus** (fig. 1) pour épargner le blé de la « rouille ».

En 1665, Hooke décrit la première observation microscopique d'un champignon phytopathogène. C'est en 1807 seulement que Prévost établit de façon claire que la carie des céréales était causée par un champignon parasite exogène, créant ainsi les bases de la phytopathologie moderne. Ses conclusions furent toutefois rejetées par l'académie des sciences de Paris et il fallut 60 ans encore pour avoir accepté de façon généralisée le concept de maladies contagieuses des végétaux causées par des champignons.



Figure 1 : La fête agricole Robigalia en l'honneur de Robigus

2. Symptomatologie :

La symptomatologie est l'étude des symptômes. Un symptôme est la manifestation visible d'une maladie causée par une infection d'un agent pathogène ou d'un désordre physiologique dû à des facteurs abiotiques. Les symptômes comportent essentiellement, par rapport à un phénotype sain, des changements de couleur, des altérations d'organes, des modifications anatomiques, des productions anormales de substances et des altérations diverses du métabolisme.

2.1.Modifications de couleur :

- **Anthocyanose** : tâches de couleur rouge-violet dues à un excès de pigments. Cet excès peut résulter, soit d'une destruction de la chlorophylle qui révèlent la présence d'anthocyanes normalement présentes, soit de la production anormalement abondante de ces pigments en cas de maladie (fig.2. a).

- **Albinisme** : absence de toute pigmentation. L'albinisme peut être d'origine génétique ou causé par des facteurs externes (herbicides agissant au niveau de la chlorophylle). Il affecte soit l'entièreté de la plante, soit une partie du tissu seulement (fig.2. b).
- **Chlorose (Hypochlorophyllose)** : tâches pâles ou jaunes dues à l'absence de chlorophylle. Quand la chlorophylle est totalement absente, on observe une jaunisse ; le jaune étant la couleur des carotènes et des xanthophylles (fig.2. c).
- **Hyperchlorophyllose** : tâches avec une forte intensité de la couleur verte donnant un aspect bleuté à l'organe (fig.2. d).
- **Mosaïque** : alternance de zones de coloration vert pâle ou vert foncé et de zones chlorotiques ou jaunâtres (fig.2. e).
- **Virescence** : pièces florales restant vertes alors qu'elles devraient être colorées (fig.2. h).
- **Mélanose** : tâches de couleur très foncée à noire dues à une accumulation de mélanines (fig.2. i).

2.2. Altérations d'organes :

- **Flétrissement** : affaissement ou perte de turgescence des tissus d'une plante due à un manque d'eau ou à un dysfonctionnement de la conduction du xylème (fig.3. a).
- **Nécroses** : Mort prématurée d'un tissu végétal résultant de la destruction non programmée de ses cellules. Les nécroses sont généralement caractérisées par du brunissement et du dessèchement (fig.3. b, c).
- **Perforations** : trous provoqués par la chute de tissus morts ou une cause traumatique brutale ou une consommation d'insectes (fig.3. d).
- **Pourriture** : décomposition des tissus qui deviennent mous et souvent bruns (fig.3. e).
- **Tâches subéreuses** : formations anormales de suber (liège) sur l'écorce ou sur les fruits (fig.3. f).



a- Anthocyanose



b- Albinisme



c- Hypochlorophyllose



d- Hyperchlorophyllose



e- Mosaïque



f- Panachure



g- Striure



h- Virescence



i- Mélanose

Figure 2 : Modifications de couleur



a- Flétrissement



b- Nécroses sur feuilles



c- Nécroses sur tige



d- Perforations



e- Pourritures



f- Tâches subéreuses

Figure 3 : Altérations d'organes

2.3.Déformations :

- **Balais de sorcière** : Prolifération anormale des rameaux à partir d'un même point de croissance chez les plantes ligneuses ; induit par certains champignons, phytoplasmes, virus ou insectes. L'ensemble ressemble à un balai (fig.4. a).
- **Bois souple** : défaut de rigidité des tiges dû à un manque de lignification.
- **Chancres** : altérations localisées de l'écorce entourées de bourrelets cicatriciels subéreux (fig.4. b).
- **Cloques** : boursouflures locales du limbe apparaissant souvent à la face supérieure des feuilles (fig.4. c, d).
- **Énations** : excroissances tissulaires anormales apparaissant à la surface des feuilles de certains légumes (fig.4. e).
- **Enroulements** : enroulement du bord du limbe vers la face supérieure (feuilles en cuillère) ou inférieure des feuilles (fig.4. f).
- **Fasciation** : Aplatissement ou soudure d'organes ou de tiges ; souvent d'origine pathologique (fig.4. g).
- **Filiformie** : tendance des feuilles à se développer essentiellement en longueur (la largeur des folioles se réduit fortement) (fig.4. h).
- **Gaufrage** : Motifs faits de creux et de reliefs sur le limbe d'une feuille (fig.4. i).
- **Galles, tumeurs** : excroissances, renflements sphériques à allongés, localisés surtout sur les racines, parfois le collet de nombreuses cultures légumières (fig.4. j, k, l).
- **Nodules ligneux** : productions ligneuses formées en surface ou à l'intérieur du tronc ou des branches qui résultent du plissement du cambium ou de la différenciation d'un méristème interne (fig.4. m).
- **Polyphyllie** : subdivision du limbe de feuilles normalement simples, accroissement du nombre de folioles chez les feuilles composées ou augmentation anormale du nombre total de feuilles (fig.4. n).



a- Balais de sorcière



b- Chancre



c- Cloques



d- Cloques



e- Enations



f- Enroulement



g- Fasciation



Copyright D. Blancard (INRA)

h- Filiformie



i- Feuilles gaufrées



© AherBouaiga 2011

j- Galles en corne



h- Galles



l- Tumeur

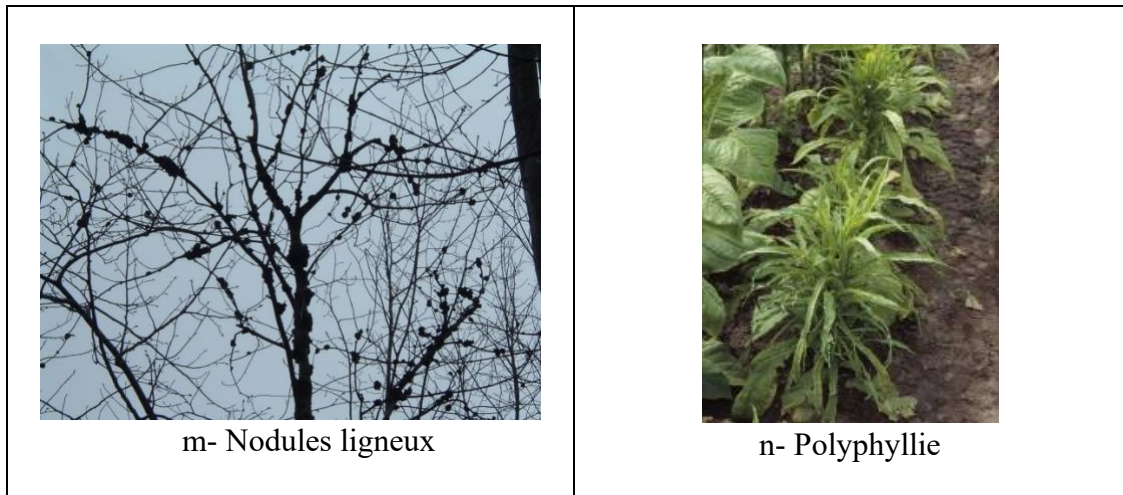


Figure 4 : Déformations

2.4. Anomalies de croissance :

- **Hypertrophie et gigantisme** : croissance anormale de certains organes ou de la plante entière due soit à une hypertrophie des cellules (accroissement) soit à une hyperplasie des cellules (multiplication anormale).
- **Nanisme et atrophie** : réduction de la taille de certains organes ou de la plante entière (fig.5. a, b).



Figure 5 : Anomalies de croissance

2.5. Identification des symptômes (diagnostic) :

L'observation et l'analyse des symptômes s'opèrent à trois niveaux :

- a. **Au niveau de la culture** : Les données collectées sur la répartition de la maladie (fig.6) apportent des indications sur le type de maladie et ses modalités de dispersion :
- Répartition généralisée : possibilité de maladie abiotique tel un problème de phytotoxicité ou de carence minérale.
 - Petits foyers dispersés : peut-être une maladie biotique transmise par les semences ou un virus transmis par un vecteur.
 - Foyer s'agrandissant tous les ans dans le sens du travail du sol : probablement un champignon du sol qui est véhiculé par les différents travaux de culture.

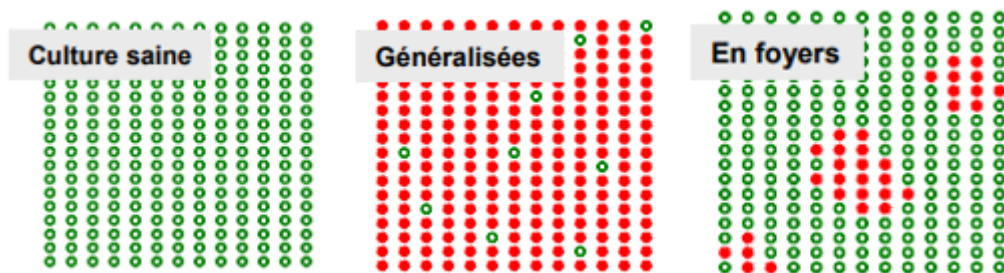


Figure 6 : Répartition de la maladie au niveau de la culture

- b. **Au niveau de la plante** : la recherche des symptômes, sur les parties ou les organes affectés de la plante, nécessite l'observation des parties visibles de la plante (fleurs, tiges, feuilles, fruits...) et des parties moins évidentes (collet, vaisseaux, racines...)
- c. **Au niveau du symptôme (caractérisation du symptôme)** : il existe deux types de symptômes :
- **Les symptômes généralistes** pouvant avoir des causes multiples (problème d'alimentation ou une infection par un champignon...)
 - **Les symptômes spécifiques** qui constituent la « signature » de la maladie et qui permettent de formuler une hypothèse précise sur le ou les agents pathogènes en cause. La spécificité d'un symptôme peut être due à l'aspect, la forme de la lésion, sa localisation ou sa répartition sur l'organe touché, la présence de fructifications...

2.6.Remarque:

La réponse de la plante à un agent causal (biotique ou abiotique) varie selon l'isolat, l'environnement et l'âge de la plante.

Chapitre II : L'Étiologie

Objectifs :

Installer chez l'étudiant une approche étiologique des maladies végétales, en lui permettant de distinguer maladies physiologiques et maladies infectieuses, de reconnaître les principaux agents phytopathogènes et de comprendre la logique du triangle de la maladie et du cycle de développement des pathogènes.

1. Définition

L'Étiologie est la science qui étudie les causes des maladies. Une maladie de plante peut être définie par une succession de réponses invisibles et visibles des cellules et des tissus d'une plante suite, à l'attaque d'un microorganisme ou à la modification d'un facteur environnemental, qui provoquent des bouleversements de forme, de fonction ou d'intégrité de la plante.

2. Les différents types de maladies :

Les maladies des plantes sont regroupées soit par type de symptômes (pourriture, nécrose, .. ect), soit par type d'organes qu'elles affectent (racinaires, foliaires,..) ou par type de plantes affectées (herbacées, ornementales, maraichères,..). Cependant, le critère le plus utile est la classification par le facteur responsable de la maladie. Cette classification permet de distinguer :

2.1. Les maladies physiologiques ou abiotiques :

2.1.1. Définition :

Les **maladies physiologiques des plantes** sont des troubles du fonctionnement normal de la plante qui **ne sont pas causés par un agent pathogène vivant** (comme les champignons, bactéries, virus ou nématodes), mais par des **facteurs abiotiques** (facteurs physiques, chimiques ou environnementaux) **défavorables**.

2.1.2. Caractéristiques des maladies physiologiques :

Les maladies physiologiques présentent généralement les caractéristiques suivantes :

- Elles **ne sont pas transmissibles** d'une plante à une autre ;
- Elles apparaissent souvent sur plusieurs plantes en même temps dans une même parcelle ;
- Leurs symptômes sont souvent uniformes ;
- Elles sont liées aux conditions du sol, du climat, de l'eau ou de la nutrition minérale.

2.1.3. Causes des maladies physiologiques :

Parmi les causes les plus fréquentes (fig. 7) qui perturbent le développement et le fonctionnement normal des plantes figurent :

a. Les facteurs climatiques :

Les conditions climatiques défavorables constituent l'une des principales causes des maladies physiologiques des plantes. Les températures extrêmes, qu'il s'agisse de chaleur excessive, de gel ou de variations brusques de température, peuvent perturber le métabolisme végétal, altérer les tissus et compromettre la croissance normale de la plante. Le vent, l'intensité lumineuse excessive ou insuffisante et l'humidité atmosphérique inadaptée peuvent également provoquer divers troubles physiologiques.

b. Les déséquilibres hydriques :

L'eau joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de la plante, et tout déséquilibre hydrique peut entraîner des perturbations importantes. La sécheresse provoque une diminution de la turgescence cellulaire, un ralentissement de la croissance et une réduction de l'activité photosynthétique, tandis que l'excès d'eau favorise l'asphyxie racinaire, limite l'absorption des éléments minéraux et affaiblit l'état physiologique général de la plante.

c. Les désordres nutritionnels :

Les maladies physiologiques peuvent également résulter d'une alimentation minérale déséquilibrée. Les carences en éléments essentiels, tels que l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium ou le fer, perturbent les fonctions vitales de la plante et se traduisent par divers symptômes, notamment la chlorose, la nécrose ou le retard de croissance. À l'inverse, un excès de certains éléments peut également devenir toxique.

d. Les facteurs édaphiques :

Les caractéristiques physico-chimiques du sol influencent directement la santé et le développement des plantes. Un pH trop acide ou trop alcalin, une mauvaise structure du sol, une faible aération, la compaction ou la salinité peuvent limiter l'absorption de l'eau et des nutriments. De même, la présence de substances toxiques dans le sol peut entraîner des désordres physiologiques importants.

e. Les facteurs chimiques :

L'utilisation inadéquate de certains produits chimiques peut être à l'origine de nombreux troubles physiologiques. Un excès d'engrais, une mauvaise application des pesticides ou la

présence de polluants atmosphériques peuvent provoquer des brûlures, des déformations, des nécroses ou des déséquilibres métaboliques chez la plante.

f. Les facteurs mécaniques :

Les agressions physiques constituent également une cause non négligeable de maladies physiologiques. Les blessures provoquées par la grêle, le vent, la taille, les manipulations culturales ou les travaux agricoles peuvent altérer les tissus végétaux et perturber les fonctions normales de la plante.



a- Sécheresse



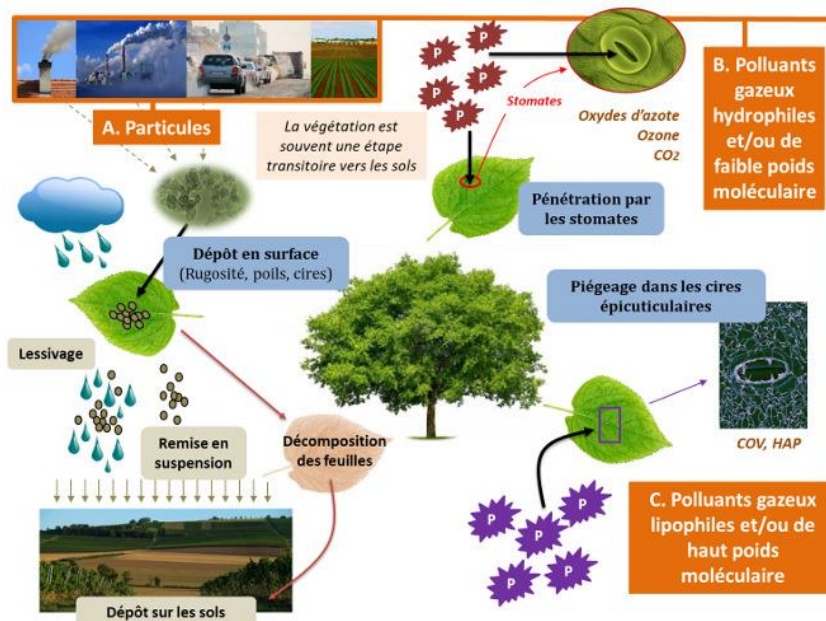
b- Inondation



c- Excès d'engrais



d- Mauvaise application des pesticides



e- Polluants

Figure 7 : Quelques causes des maladies physiologiques

2.1.4. Symptômes liés aux maladies physiologiques :

a. La chlorose :

Elle se manifeste par un jaunissement des feuilles dû à une diminution de la chlorophylle. Elle est souvent liée à des carences minérales, à un excès d'eau ou à un pH défavorable du sol.

b. Les nécroses :

Les nécroses correspondent à la mort localisée des tissus végétaux. Elles apparaissent sous forme de taches brunes ou desséchées sur les feuilles, les tiges, les racines ou les fruits.

c. Le flétrissement :

Le flétrissement se traduit par une perte de turgescence de la plante, qui prend un aspect affaîssi. Il est généralement causé par un manque d'eau ou par une mauvaise absorption hydrique liée à l'asphyxie racinaire.

d. Le ralentissement de la croissance :

Les maladies physiologiques peuvent provoquer une diminution ou un arrêt de la croissance, entraînant un développement faible et une réduction de la vigueur de la plante.

e. Les déformations :

Certaines anomalies physiologiques provoquent des déformations des feuilles, des tiges, des fleurs ou des fruits, comme l'enroulement, les fissures ou une croissance irrégulière.

f. Les brûlures :

Elles apparaissent souvent sur les bords ou les extrémités des feuilles. Elles sont généralement dues à la salinité, à la chaleur, au stress hydrique ou à un excès de produits chimiques.

g. La chute prématurée des organes :

Les feuilles, fleurs ou fruits peuvent tomber avant leur maturité sous l'effet de stress environnementaux ou de déséquilibres physiologiques.

h. Les anomalies de coloration :

En plus du jaunissement, certaines plantes peuvent présenter des rougeurs, des violacés ou d'autres changements de couleur liés à des troubles nutritionnels ou métaboliques (fig. 8).

i. La baisse de rendement :

Les maladies physiologiques peuvent altérer la floraison, la fructification et la qualité des récoltes, entraînant une diminution du rendement.

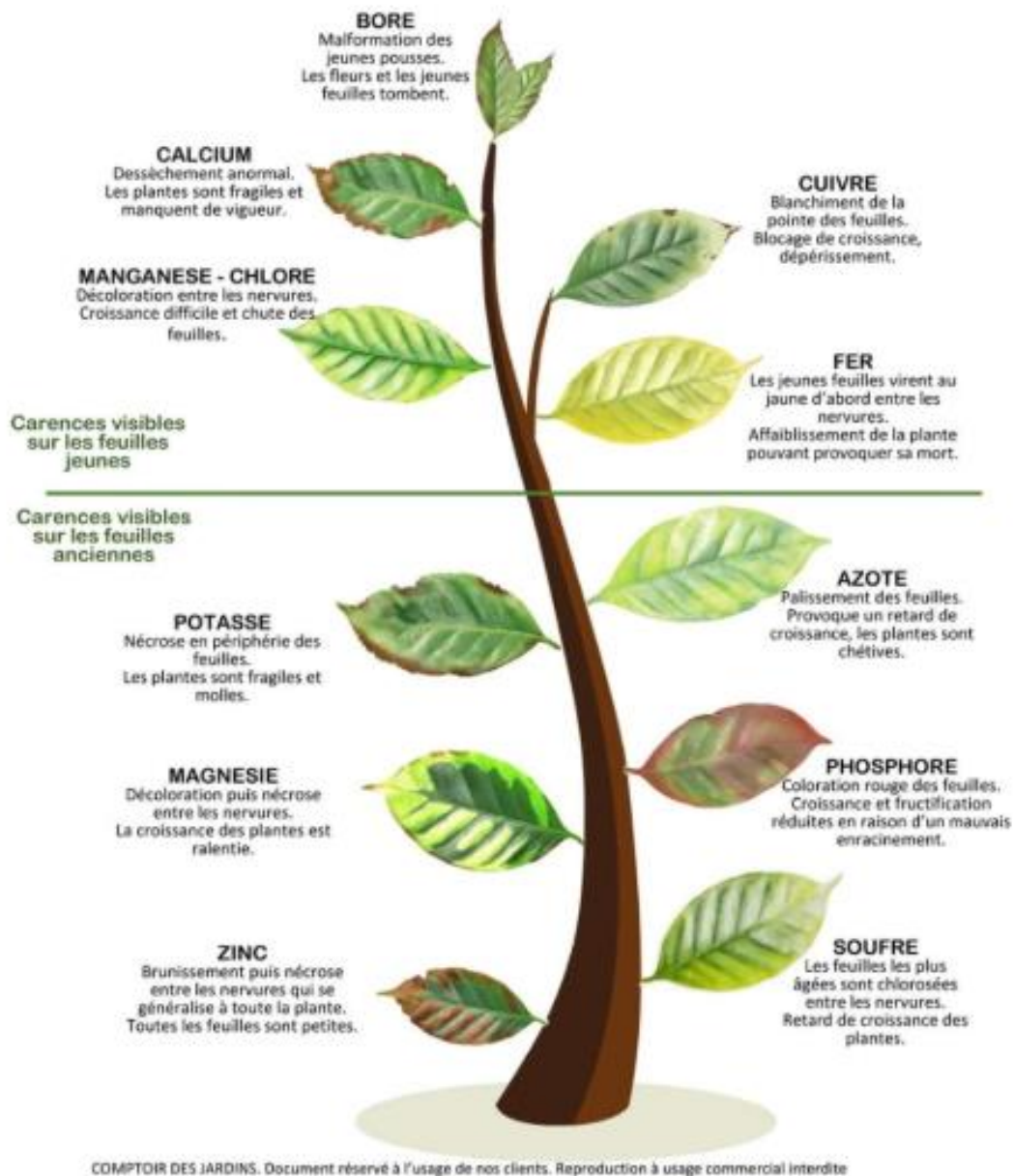


Figure 8 : Symptômes liés aux principales carences en minéraux

2.2. Les maladies parasitaires (= infectieuses ou biotiques) :

2.2.1. Définition :

Les maladies parasitaires des plantes sont des altérations de l'état normal de la plante provoquées par des organismes vivants pathogènes (virus, phytoplasmes, bactéries, champignons) qui se développent aux dépens de celle-ci. Ces agents sont généralement **infectieux**, car ils pénètrent dans l'hôte, l'envahissent et s'y multiplient, et souvent **contagieux**, puisqu'ils peuvent se transmettre d'une plante infectée à une plante saine.

2.2.2. Les agents phytopathogènes :

Les maladies parasitaires sont provoquées par différents types d'agents biologiques (virus, bactéries, champignons, nématodes, insectes, plantes parasites ...etc) appelés **agents phytopathogènes**. Ces organismes ont la capacité d'envahir les tissus végétaux, d'y prélever les substances nutritives nécessaires à leur développement et de perturber le fonctionnement normal de la plante.

A. Les virus :

Les virus sont des parasites intracellulaires obligatoires, capables de se multiplier uniquement dans les cellules vivantes (fig. 9). Leur taille est très petite et ne sont visibles qu'au microscope électronique. Ils sont constitués d'une partie centrale nommée virion, constituée d'un acide nucléique d'ADN ou d'ARN, protégé par une enveloppe symétrique de nature protéique, appelée capsid (fig. 10). On distingue donc les virus à ADN et les virus à ARN. Il existe 1210 espèces connues de virus de plantes réparties en 20 familles.

Pour la nomenclature des phytovirus, le nom de l'espèce est généralement composé du nom de l'hôte à partir duquel le premier membre a été décrit, du type de symptômes qu'il induit, suivi parfois de l'origine géographique de sa détection, puis du terme « virus ». Exemple : le nom du virus de la jaunisse nanisante de l'orge est **BYDV** (= **B**arley **Y**ellow **D**warf **V**irus).

Les maladies virales peuvent avoir de graves incidences économiques. Les symptômes liés aux infections virales sont nombreux comme : le nanisme, la chlorose, la nécrose, la mosaïque, la jaunisse, la fasciation...etc.

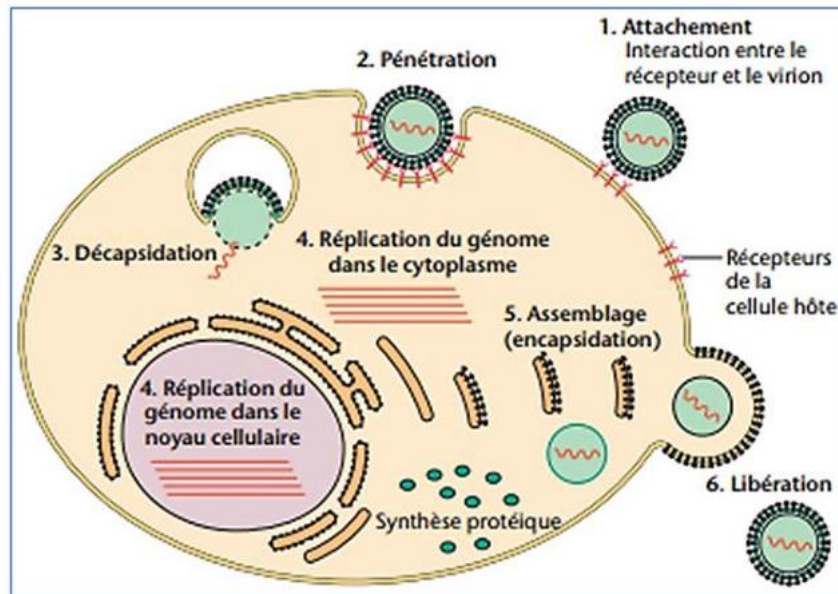


Figure 9 : Cycle de reproduction d'un virus

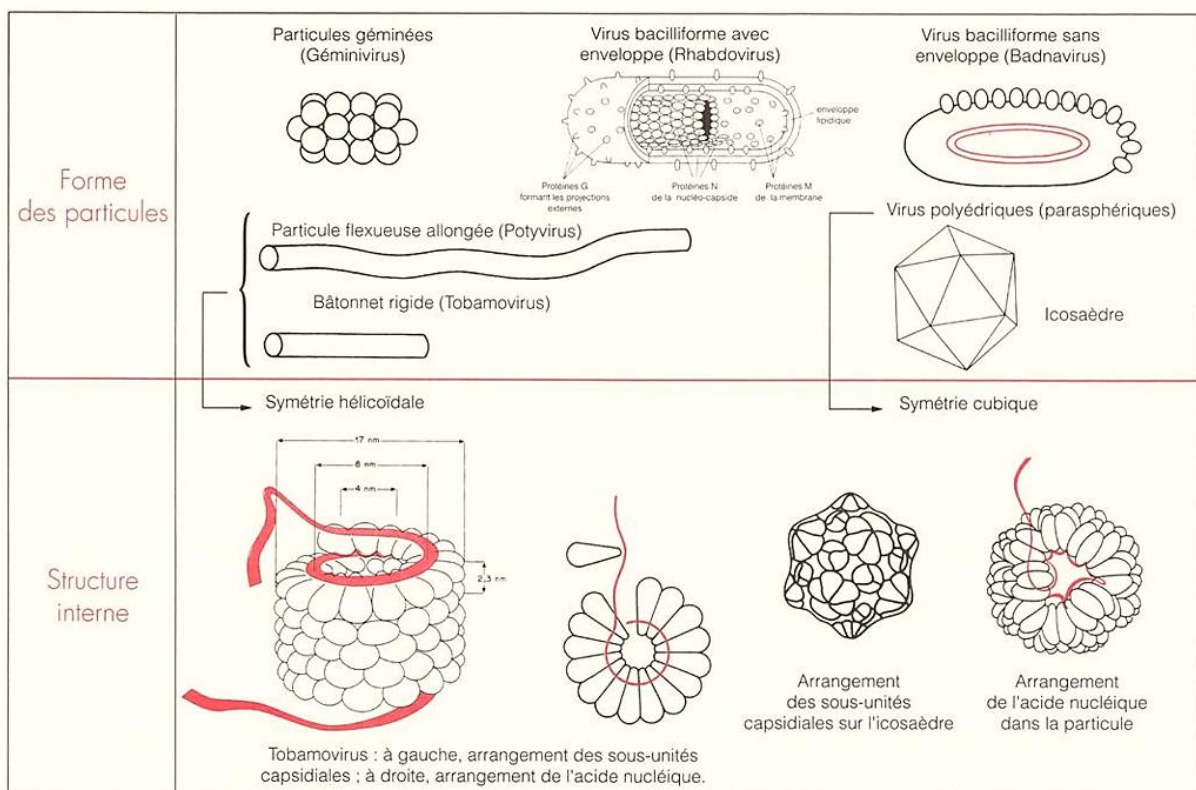


Figure 10 : Forme et architecture de quelques genres de phytovirus

B. Les bactéries :

Les bactéries sont des organismes strictement microscopiques. Elles sont unicellulaires, munies d'une paroi externe rigide de nature glucidique, dépourvues de chlorophylle, sans noyau véritable (procaryote) mais possédant un chromosome circulaire (fig. 11). Elles présentent des

formes variables : rondes, en bâtonnets, incurvées ou spiralées (fig. 12). Le plus souvent celles qui sont phytopathogènes (environ 300) ont la forme allongée de bâtonnets dont les dimensions varient entre 1 et 5 μm de longueur sur 1 μm de largeur. Elles se reproduisent par scissiparité (ou fissiparité) (fig. 13).

Les bactéries phytopathogènes sont réparties en deux groupes en fonction de la nature chimique de leur enveloppe : les bactéries gram^+ et gram^- . Elles sont naturellement présentes à la surface des organes aériens ou souterrains. La plupart des bactéries phytopathogènes sont nécrotrophes : elles tuent les cellules de la plante au fur et à mesure de leur progression pour se nourrir des tissus morts. C'est notamment le cas du feu bactérien, causé par *Erwinia amylovora* (fig. 14). Les bactéries biotrophes (qui n'établissent de relations avec la plante que si celle-ci reste vivante) sont rares.

Les principaux genres de bactéries phytopathogènes sont : *Agrobacterium*, *Corynebacterium*, *Erwinia*, *Pseudomonas* et *Xanthomonas*. Les symptômes sont variés : nécroses, pourritures, tumeurs, flétrissements.

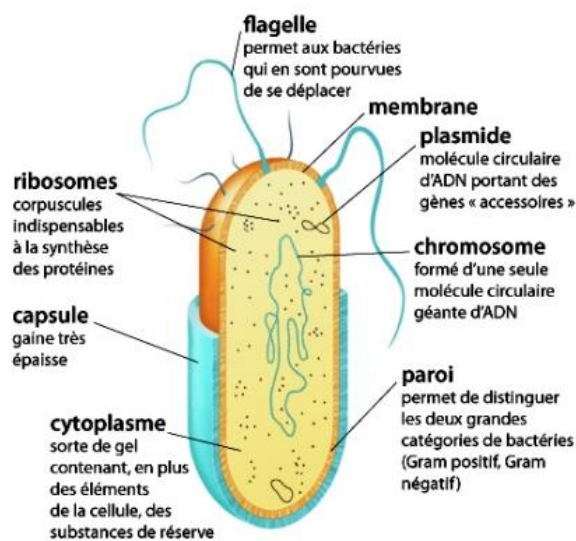


Figure 11 : Schéma générale d'une bactérie

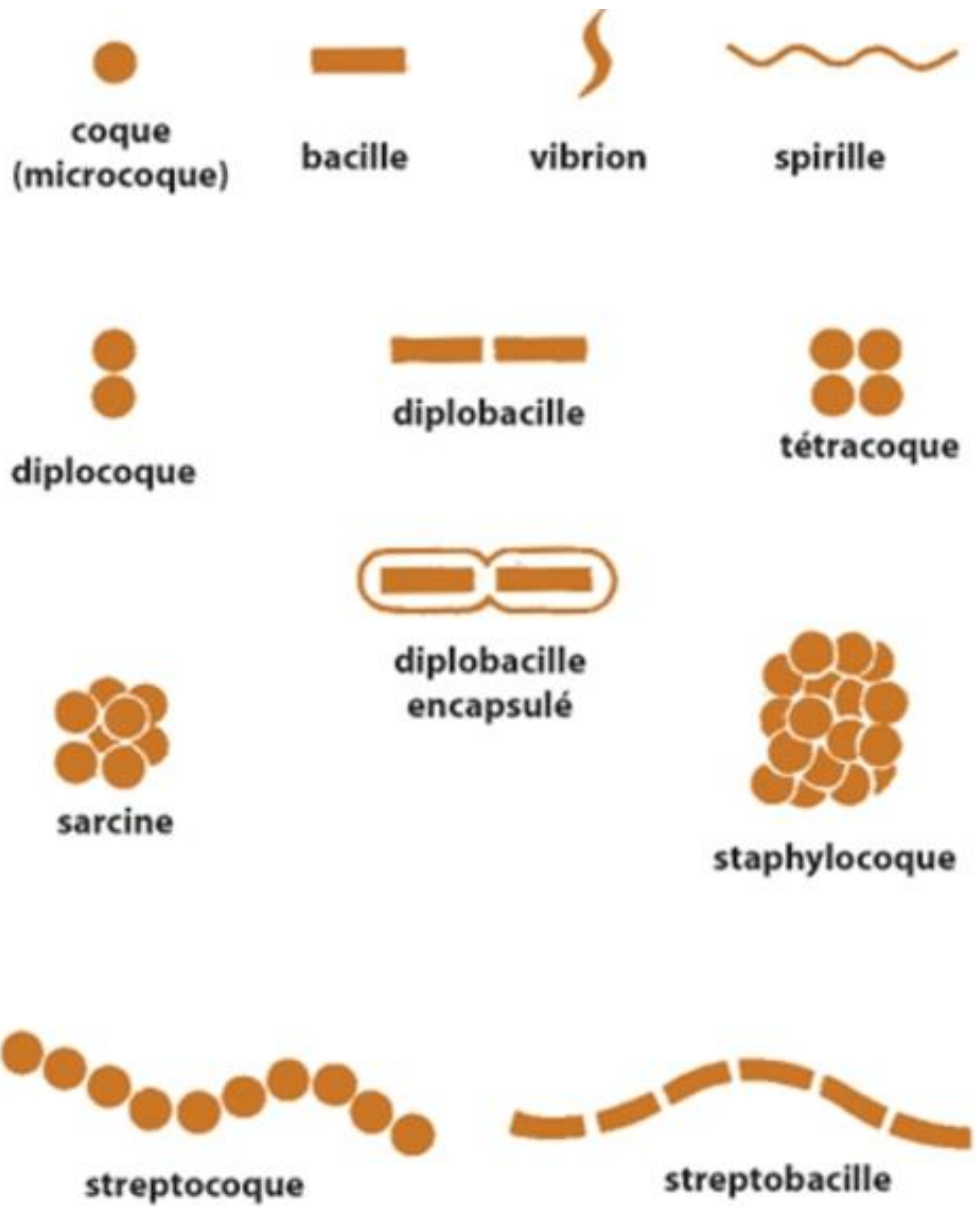


Figure 12: Différentes formes de bactérie

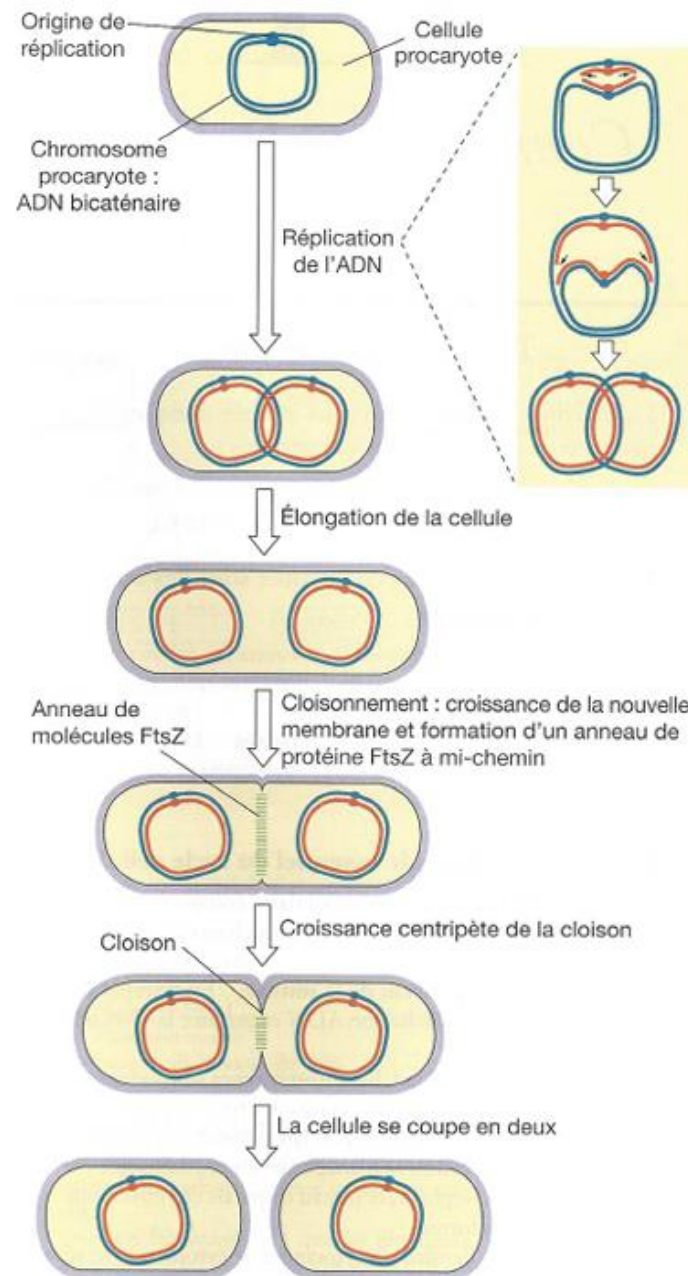


Figure 13 : Reproduction des bactéries par scissiparité



Figure 14 : Feu bactérien sur poirier avec exsudat visible

C. Les champignons :

Les maladies fongiques, ou cryptogamiques, représentent la menace phytopathologique prédominante, étant responsables d'environ 75 % des pathologies infectieuses chez les cultures mondiales. Ce groupe se distingue par une hétérogénéité exceptionnelle, tant sur le plan morphologique (diversité des formes, tailles et pigmentations) que biologique, notamment par la multiplicité de leurs modes de reproduction et de leurs aptitudes métaboliques.

Sur le plan nutritionnel, ces agents se classent selon leur stratégie trophique en :

- **Biotrophes** : Ils ont besoin de la plante vivante (ex : les Rouilles ou l'Oïdium). Ils ne tuent pas leur hôte rapidement car ils en ont besoin pour survivre.
- **Nécrotrophes** : Ils "bombardent" la plante de toxines pour tuer les cellules et consommer la matière organique qui en résulte (ex : le Botrytis).
- **Hémibiotrophes** : Ils débutent leur cycle par une phase biotrophe discrète avant de basculer vers une phase nécrotrophique destructrice.

Selon leur degré de dépendance, ils agissent comme des **parasites obligatoires**, strictement liés à leur hôte, ou **facultatifs**, capables de survivre en tant que **saprophytes** sur la matière organique morte.

Structurellement, leur appareil végétatif est constitué de filaments microscopiques, les **hyphes** (cloisonnés) ou les **siphons** (continus), dont l'entrelacement complexe forme le **mycélium**, l'unité fonctionnelle de colonisation des tissus végétaux (fig. 15).

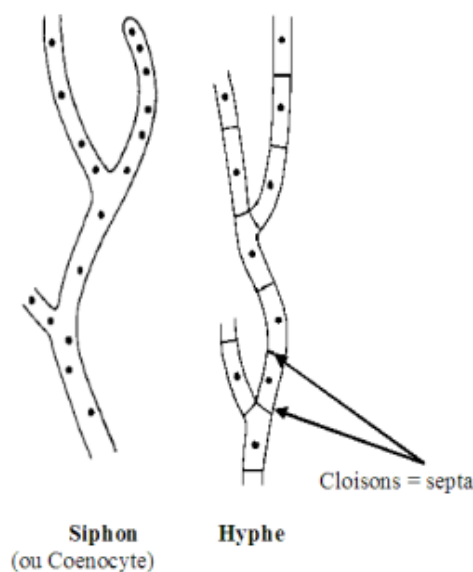


Figure 15 : Filaments fongiques

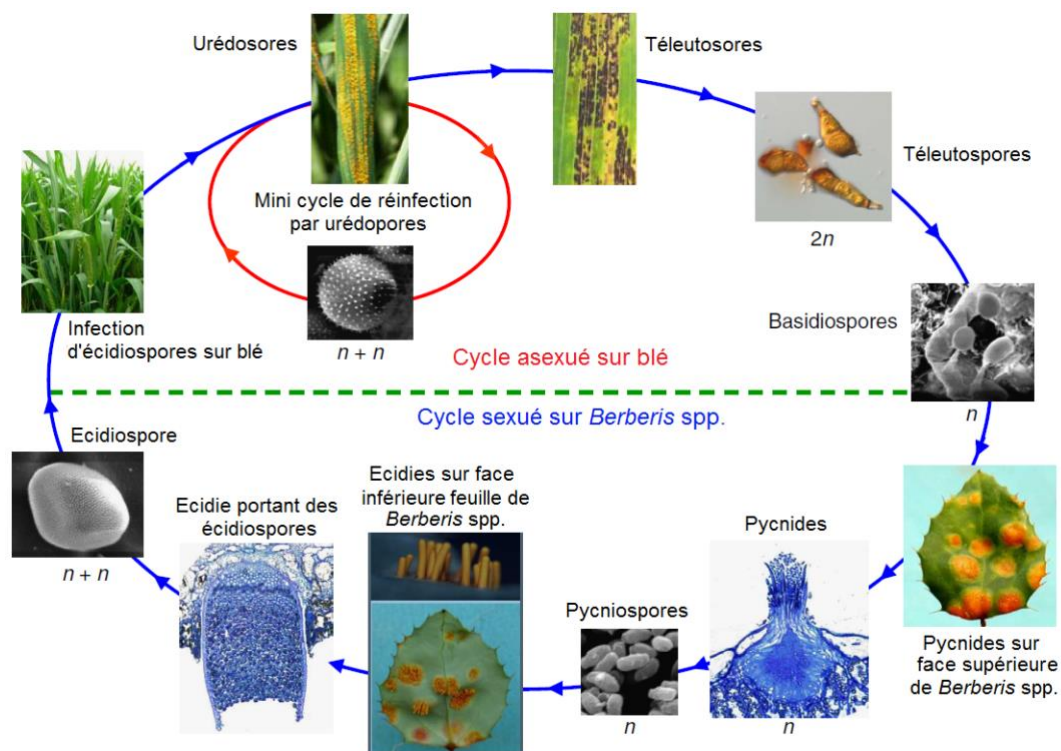
Les champignons phytopathogènes se reproduisent selon deux modes principaux : la reproduction asexuée et sexuée (fig. 16).

- **La reproduction asexuée** est la plus fréquente. Elle se fait par la production de spores (conidies, sporangiospores) qui assurent une dissémination rapide et massive des pathogènes.
- **La reproduction sexuée**, quant à elle, implique la fusion de cellules spécialisées et conduit à la formation de spores sexuées plus résistantes, favorisant la survie en conditions défavorables et la diversité génétique.

Cette double stratégie permet aux champignons de s'adapter efficacement à leur environnement et de maintenir leur capacité d'infection.

Les groupes des champignons phytopathogènes les plus importants sont : les zygomycètes, les ascomycètes, les basidiomycètes et les deutéromycètes, en plus du groupe des oomycètes.

Les symptômes liés aux maladies fongiques sont très variés comme les tâches sur les feuilles, les pourritures, les chancres, les flétrissements...etc.



Source : W. Zheng et al. 2013. High genome heterozygosity and endemic genetic recombination in the wheat stripe rust fungus. *Nature communications*. DOI: 10.1038/ncomms3673

Figure 16 : Cycles de reproduction sexuée et asexuée de *Puccinia striiformis*.

D. Les nématodes :

Les nématodes sont de petits vers microscopiques qui parasitent les plantes, causant ainsi des maladies (fig. 17). Ils possèdent une bouche armée d'un stylet qui leur permet de perforer les tissus végétaux et d'aspirer la sève.

Leur reproduction peut être sexuée, hermaphrodite ou parthénogénétique et conduit à la formation d'œufs (fig. 18). Ils sont extrêmement abondants dans l'eau, dans le sol et surtout dans la matière organique en décomposition, où ils vivent à l'état libre.

Ils existent des nématodes endoparasites qui vivent à l'intérieur de la plante et attaquent généralement les racines (Ex : *Meloidogyne*). Ils provoquent la formation de tumeurs, de nodosités, de galles ainsi que des nécroses et des pourritures du système racinaire (fig. 19). D'autres sont ectoparasites, ils piquent les plantes de l'extérieur et envahissent différents organes de la plante. Ils provoquent des lésions, Jaunissement des feuilles, ralentissement de la croissance, flétrissement plus ou moins généralisé et mort de la plante.

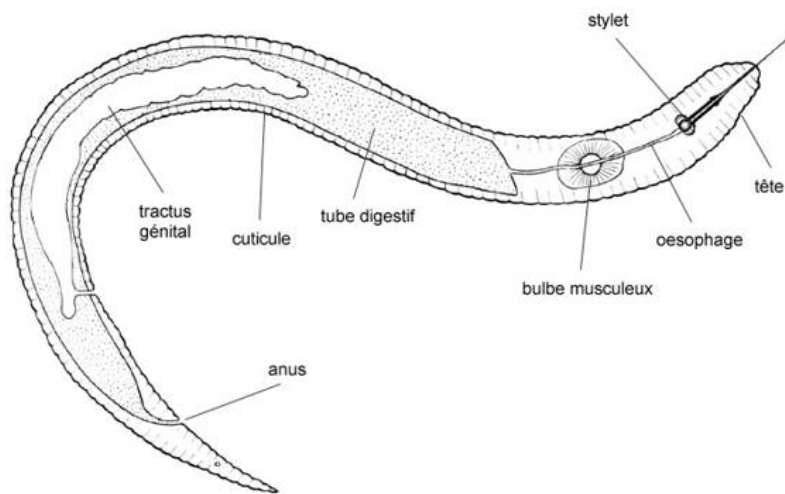


Figure 17 : Schéma d'un nématode parasite

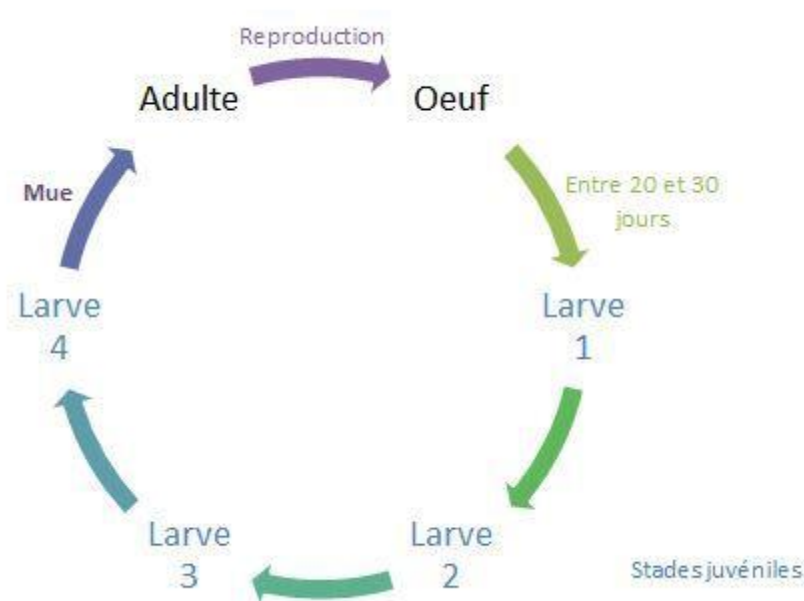


Figure 18 : Cycle de vie des nématodes



Figure 19 : Carotte attaquée par les nématodes

E. Les insectes :

Les insectes phytophages sont des organismes qui se nourrissent principalement de tissus végétaux vivants, jouant ainsi un rôle majeur dans les écosystèmes naturels et agricoles. Ils appartiennent à plusieurs ordres, notamment les Lepidoptera, Coleoptera, Hemiptera et Orthoptera. Leur mode d'alimentation varie selon les espèces : certains sont **broyeurs** (chenilles défoliatrices), d'autres **piqueurs-suceurs** comme les pucerons qui prélèvent la sève, ou encore **mineurs** et **foreurs** qui vivent à l'intérieur des tissus végétaux (fig. 20).

Les insectes phytophages présentent des adaptations morphologiques (pièces buccales spécialisées) et physiologiques (enzymes digestives capables de dégrader la cellulose ou de neutraliser les composés toxiques des plantes).

Leur interaction avec les plantes peut être nuisible, entraînant des pertes de rendement agricole, la transmission de maladies (virus, bactéries), et des dégâts visibles tels que chloroses, nécroses ou déformations. Cependant, ils jouent également un rôle écologique important en régulant la végétation et en participant aux chaînes trophiques.

Leur cycle biologique, souvent complexe (œuf, larve, nymphe, adulte), influence leur dynamique de population et conditionne les stratégies de lutte, notamment en phytopathologie et en protection intégrée des cultures (fig. 21).

 <p>a- Pucerons</p>	 <p>b- Cochenilles farineuses</p>
 <p>c- Chrysomèle</p>	 <p>d- Coléoptère phytophage</p>

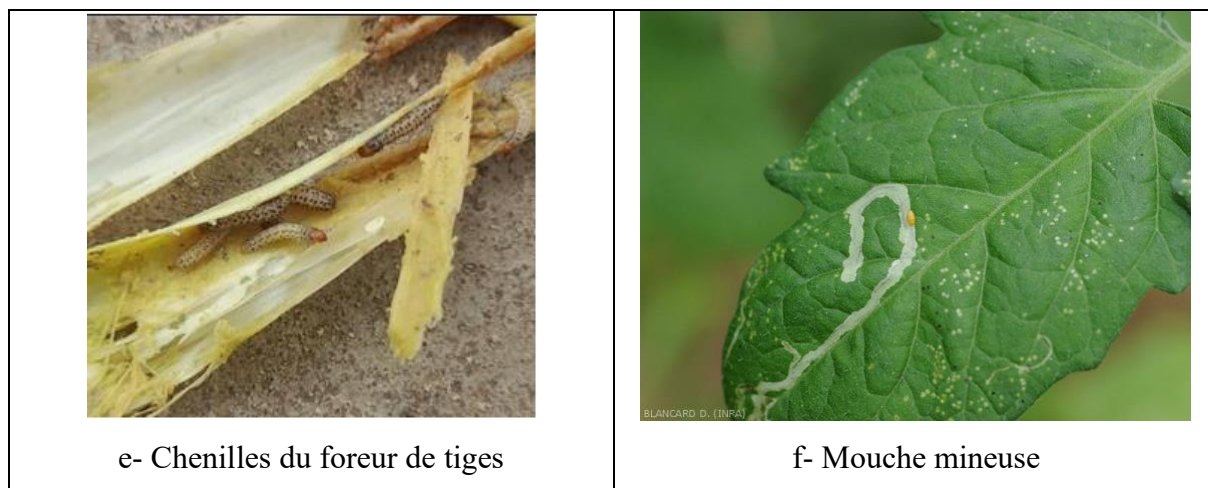


Figure 20 : Exemples d'insectes nuisibles

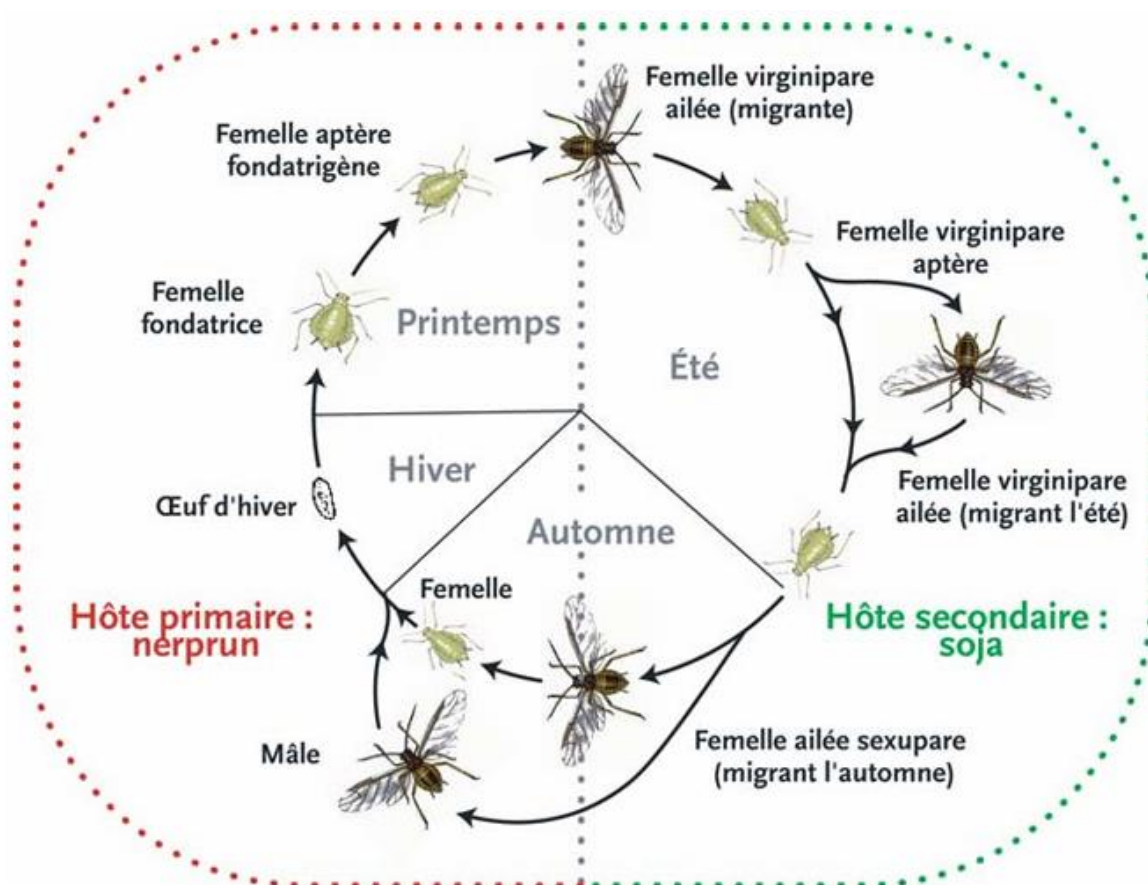


Figure 21 : Cycle biologique du Puceron du soja

F. Les plantes parasites :

Les plantes parasites sont des végétaux à fleurs appartenant majoritairement aux dicotylédones, caractérisés par leur incapacité totale ou partielle à assurer leur nutrition de manière autonome. Elles dépendent ainsi d'autres plantes autotrophes, appelées **hôtes**, dont elles exploitent les ressources grâce à des organes spécialisés appelés haustoria (ou suçoirs), qui établissent une connexion directe avec les tissus conducteurs (xylème et/ou phloème). Selon leur degré de dépendance, on distingue deux grandes catégories :

- **Les hémiparasites** : ce sont des plantes chlorophylliennes capables de réaliser la photosynthèse et donc de produire une partie de leur matière organique. Toutefois, elles restent dépendantes de leur hôte pour l'approvisionnement en eau et en sels minéraux, qu'elles prélèvent à partir de la sève brute. Elles sont souvent dépourvues de système racinaire fonctionnel ou peu développé. Exemple : *Viscum album* (le gui).
- **Les holoparasites** : totalement dépourvues de chlorophylle, elles sont incapables de photosynthèse et dépendent entièrement de leur hôte pour leur alimentation, puisant aussi bien la sève brute que la sève élaborée. Elles possèdent des haustoria très développés qui pénètrent profondément dans les tissus de l'hôte jusqu'aux faisceaux conducteurs. Exemple : la cuscute.

Par ailleurs, les plantes parasites peuvent également être classées selon leur mode de fixation sur l'hôte :

- **Les épirhizes** : elles se fixent au niveau des racines de la plante hôte et exploitent directement les ressources souterraines. C'est le cas de *Striga*, redoutée en agriculture pour ses dégâts sur les céréales.
- **Les épiphytes parasites (ou épiphytes au sens large dans ce contexte)** : elles se développent sur les parties aériennes de l'hôte, notamment les tiges et les branches, comme le gui, qui s'installe sur les arbres et arbustes.

Ces plantes présentent ainsi des adaptations morphologiques et physiologiques remarquables (réduction des feuilles, germination stimulée par des signaux chimiques de l'hôte, croissance orientée), leur permettant d'exploiter efficacement leur hôte (fig. 22). Leur impact est considérable en agriculture, où elles peuvent entraîner d'importantes pertes de rendement, mais elles jouent également un rôle écologique en influençant la dynamique et la diversité des communautés végétales.



a- Cytinet



b- Orobanche sur colza



c- Striga sur maïs



d- Cuscute



e- Gui sur une branche d'arbre



f- Germination des graines de gui

Figure 22 : Exemples de plantes parasites

G. Les mauvaises herbes :

Les mauvaises herbes, également appelées adventices, sont des plantes spontanées non cultivées qui se développent dans les agrosystèmes et les biotopes perturbés par l'activité humaine (fig. 23). Elles sont particulièrement bien adaptées aux conditions culturales grâce à leur grande plasticité écologique, leur croissance rapide et leur forte capacité de reproduction (production abondante de graines, dormance, dissémination efficace). Leur impact sur les cultures est multiple. D'une part, elles exercent un effet direct de compétition vis-à-vis des ressources essentielles à la croissance des plantes cultivées, telles que l'eau, les éléments minéraux, la lumière et l'espace, ce qui peut entraîner une diminution significative des rendements. Certaines espèces libèrent également des substances chimiques inhibitrices, un phénomène connu sous le nom d'allélopathie, qui freine la germination ou la croissance des cultures voisines.

D'autre part, les mauvaises herbes ont des effets indirects néfastes : elles peuvent contaminer les récoltes par la présence de graines ou de débris végétaux, réduisant ainsi la qualité des produits agricoles et leur valeur commerciale. Elles compliquent également les opérations culturales (récolte, irrigation, traitements phytosanitaires) et augmentent les coûts de production. Par ailleurs, elles constituent souvent des réservoirs ou hôtes secondaires pour de nombreux ravageurs (insectes phytophages) et agents pathogènes (champignons, bactéries, virus), favorisant ainsi la propagation des maladies au sein des cultures. Cependant, dans certains contextes, elles peuvent aussi jouer un rôle écologique bénéfique, notamment en contribuant à la biodiversité, à la protection du sol contre l'érosion et au maintien de certains équilibres biologiques.

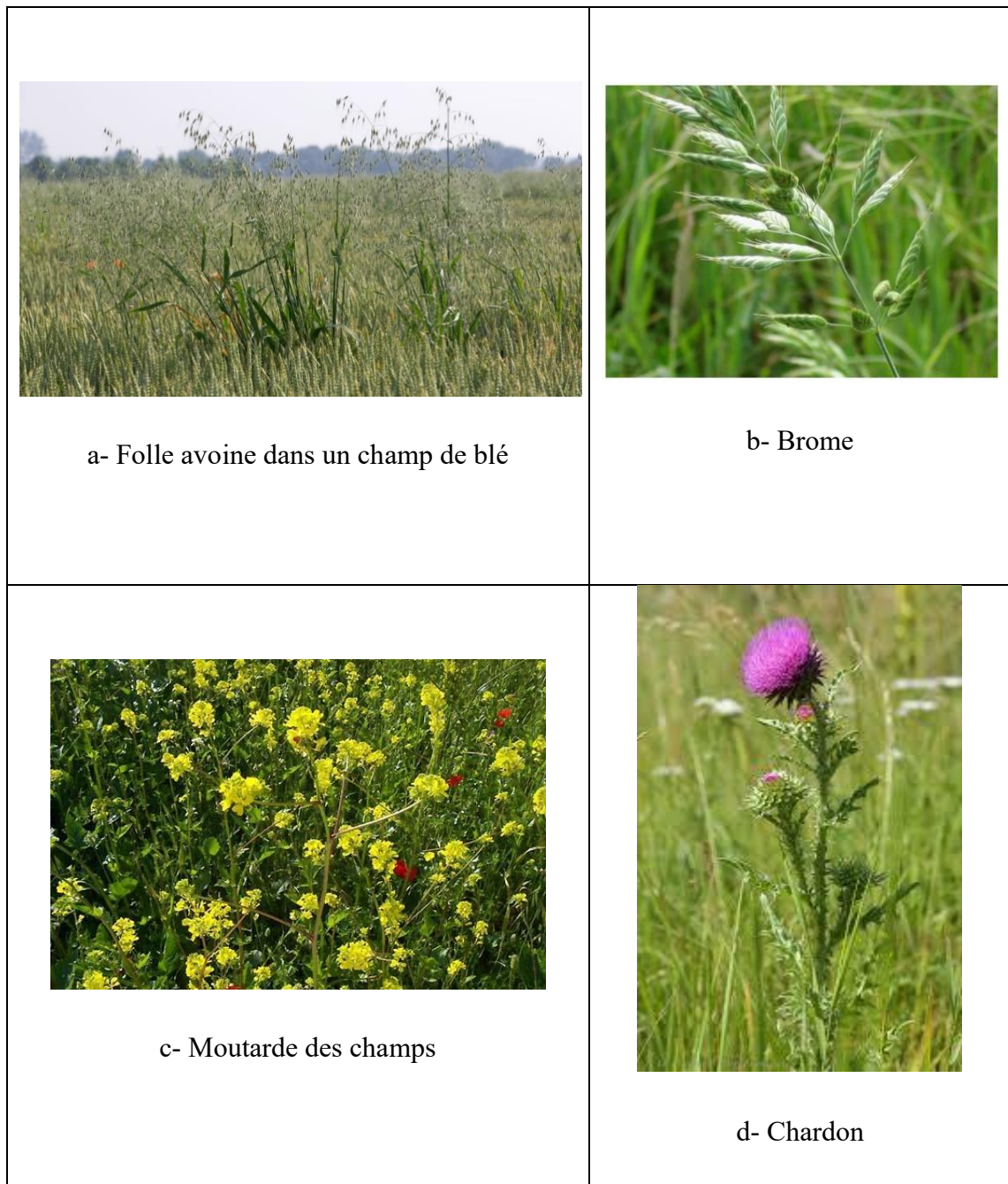


Figure 23 : Exemples de mauvaises herbes

2.2.3. Le triangle de la maladie :

Une maladie parasitaire se développe sur une plante lorsqu'un agent pathogène virulent et un hôte susceptible se rencontre dans un environnement favorable. Ces trois facteurs (l'agent pathogène, la plante hôte et les conditions climatiques) forment le triangle de la maladie (fig. 24).

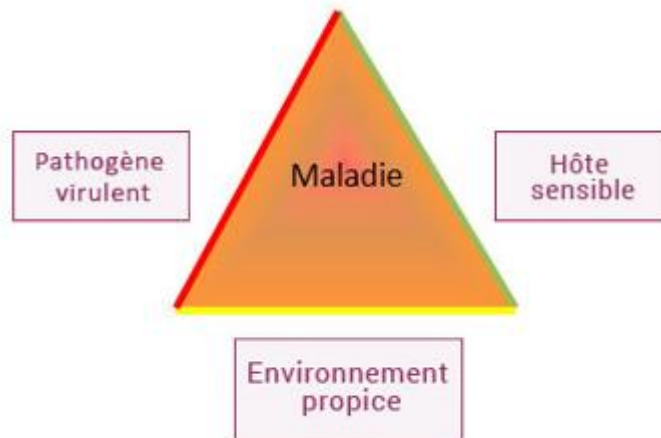


Figure 24 : Triangle de la maladie

2.2.4. Notion d'épidémiologie végétale :

L'épidémiologie végétale est l'étude des populations d'agents pathogènes au sein des populations de plantes, ainsi que des facteurs qui influencent le développement et la propagation des maladies dans le temps et dans l'espace. Elle repose sur le concept fondamental du **triangle de la maladie**, qui stipule qu'une épidémie ne peut se déclencher que si trois conditions convergent simultanément : un hôte sensible, un agent pathogène virulent et un environnement favorable (température, humidité, vent).

On distingue généralement deux grands types d'épidémies selon le cycle de reproduction du pathogène : les maladies **monocycliques**, où une seule génération d'infection se produit durant la saison de culture (souvent liées à l'inoculum du sol), et les maladies **polycycliques** (fig. 25), comme le mildiou ou les rouilles, caractérisées par plusieurs cycles d'infection successifs permettant une explosion démographique rapide de la maladie. L'objectif final de l'épidémiologie est de modéliser ces dynamiques pour prévoir les risques d'attaques et optimiser les stratégies de lutte intégrée.

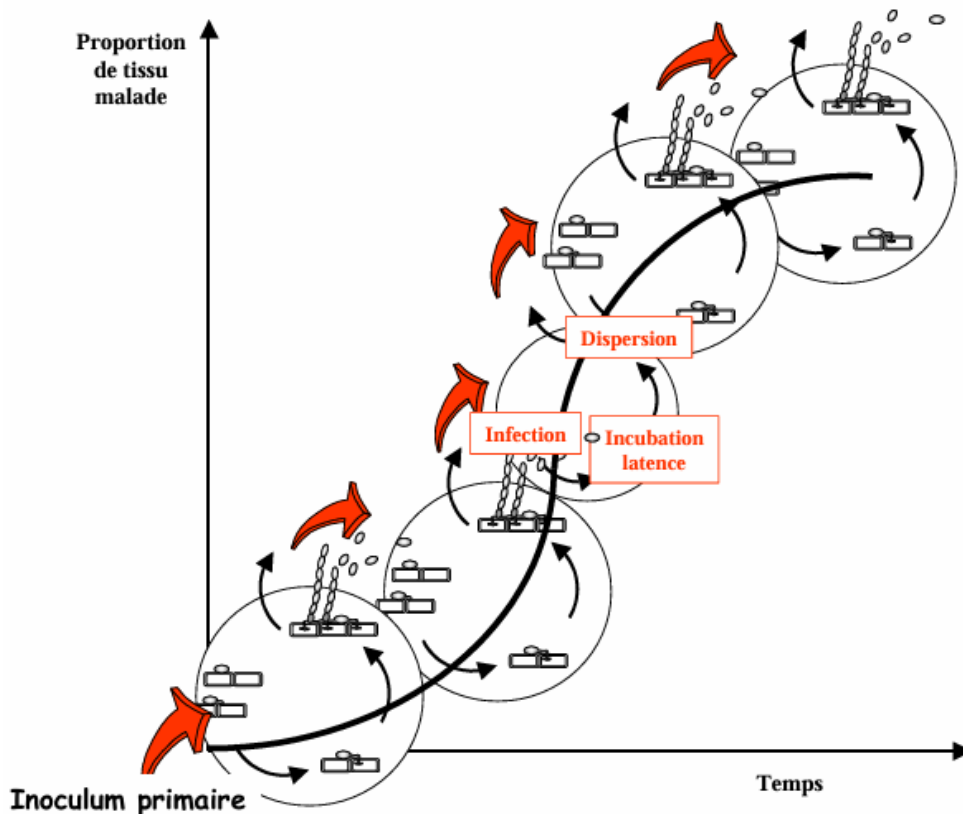


Figure 25 : Schéma d'une maladie polycyclique

2.2.5. Cycle de développement de la maladie parasitaire :

L'infection des plantes par un agent phytopathogène se déroule selon un processus appelé « cycle de la maladie » dont la complexité varie selon la nature du parasite, mais qui comprend toujours un certain nombre d'étapes obligatoires (fig. 26) :

- **Transmission des germes :** c'est la propagation d'un agent pathogène d'une plante à une autre ou d'un organe à un autre. Elle se fait par le vent, l'eau, les graines, le sol, les insectes et l'homme.
- **Contamination :** c'est la phase d'installation d'un agent pathogène sur son hôte, mais la fonction parasitaire n'a pas encore commencé.
- **Infection :** il y a infection lorsque le parasite pénètre dans la plante contaminée. La période d'infection varie selon les parasites et dépend directement des conditions environnementales.
- **Incubation :** c'est la période s'écoulant entre l'infection et l'apparition des premiers symptômes. La durée de la période d'incubation varie selon les parasites et les conditions environnementales, mais elle dépend surtout des réactions de défense de la plante et la virulence du parasite.

- **Invasion et fructification** : le dernier stade de l'évolution de la maladie se traduit par l'invasion. La manifestation des symptômes est le signe perceptible de l'invasion du végétal par l'agent pathogène.

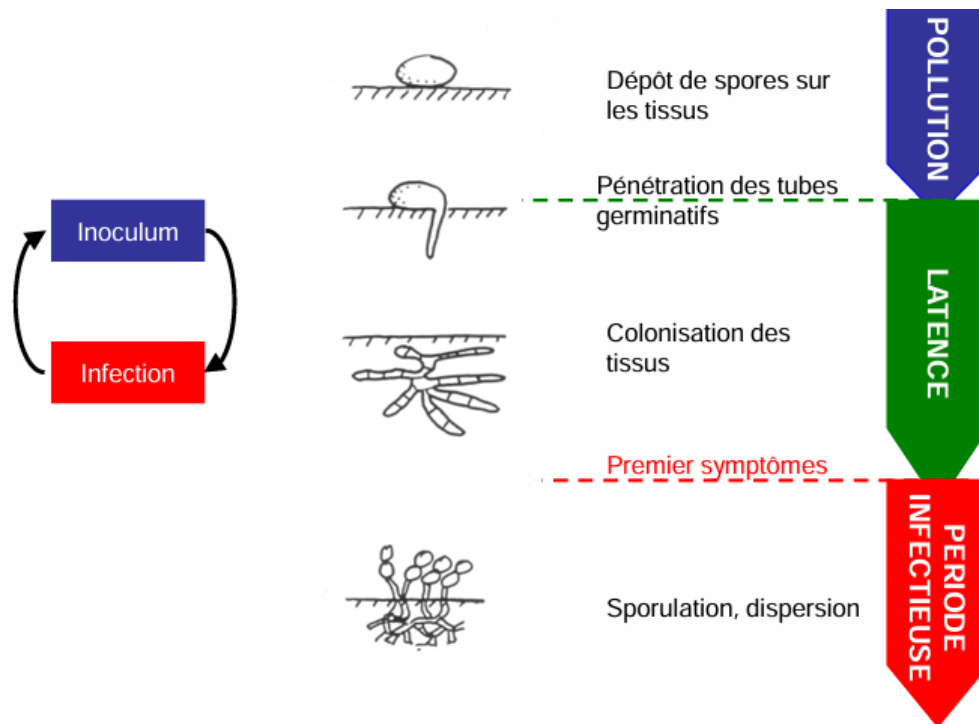


Figure 26 : Cycle infectieux de base d'un champignon pathogène

Chapitre III : Les facteurs de développement et le diagnostic

Objectifs :

Faire comprendre à l'étudiant la dynamique des relations hôte–pathogène et des mécanismes de résistance, en intégrant les concepts de Van der Plank et de Flor, ainsi que les stratégies de défense des plantes, et en l'amenant à appliquer une démarche de diagnostic (observation et expérimentation) pour identifier les agents phytopathogènes.

1. Les relations hôte-pathogène :

Les relations hôte-pathogène désignent l'ensemble des interactions complexes et dynamiques qui s'établissent entre une plante et un agent infectieux.

1.1. Les types de relations hôte-pathogène :

L'interférence entre un agent pathogène et un végétal peut conduire à deux types de relations fondamentales :

A. La relation non-hôte (Résistance d'espèce) : Elle se caractérise par une incompatibilité fondamentale et absolue entre tous les cultivars d'une espèce végétale donnée et tous les biotypes d'un parasite déterminé. C'est la forme de résistance la plus commune dans la nature.

B. La relation hôte : Le pathogène est capable d'infecter la plante, mais l'issue de l'attaque dépend de la compatibilité génétique entre les deux partenaires. Deux cas se présentent (fig. 27) :

- **La relation incompatible (Résistance) :** Correspond à un arrêt précoce de la croissance du parasite et de la colonisation. L'absence de maladie résulte d'une reconnaissance mutuelle : l'hôte est **résistant** et le pathogène est **avirulent**.
- **La relation compatible (Sensibilité) :** Correspond à une multiplication active du pathogène et à une colonisation étendue de l'hôte. La maladie se développe car l'hôte est **sensible** et le pathogène est **virulent**.

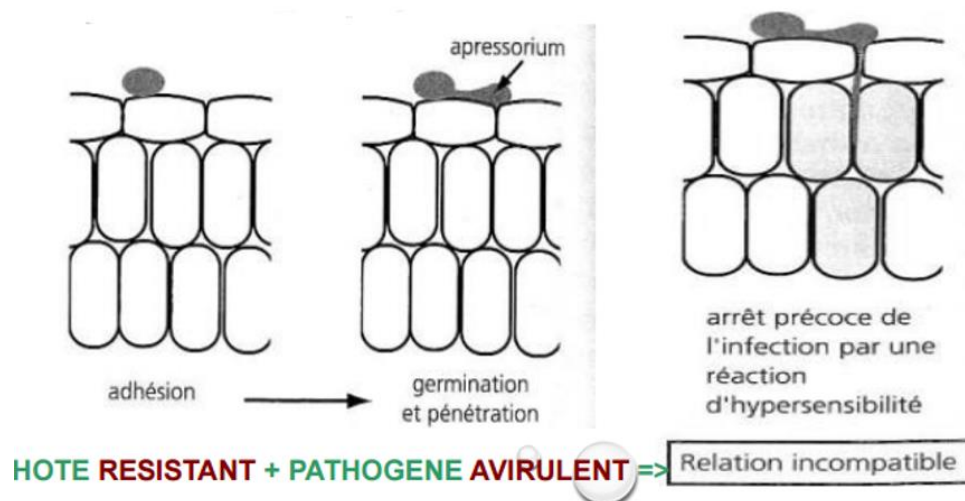
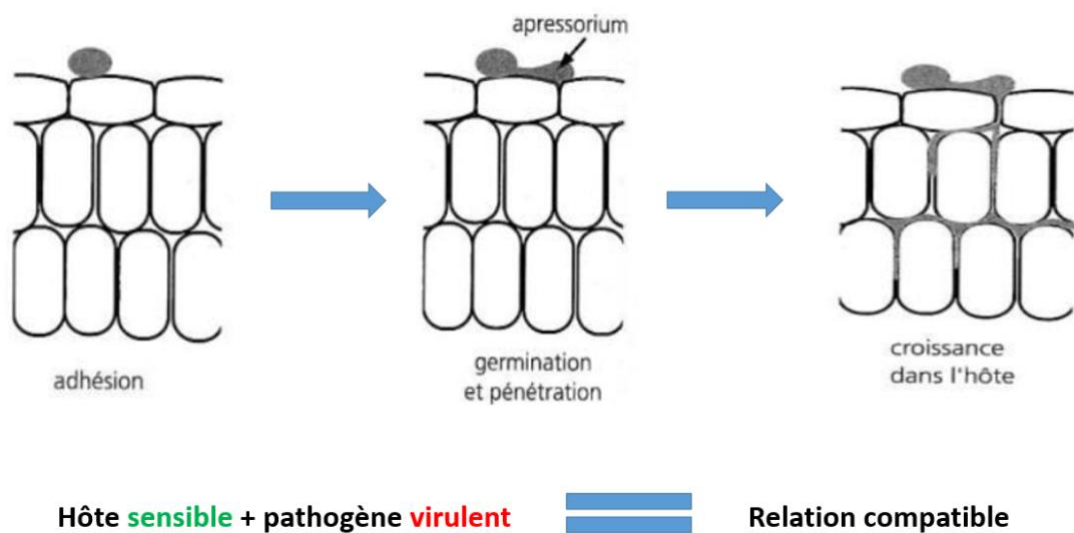


Figure 27 : Relations compatible et incompatible

1.2. Les types de résistances selon Van der Plank

Selon Van der plank (1965), la résistance de la plante hôte peut être analysée génétiquement et divisée en deux catégories :

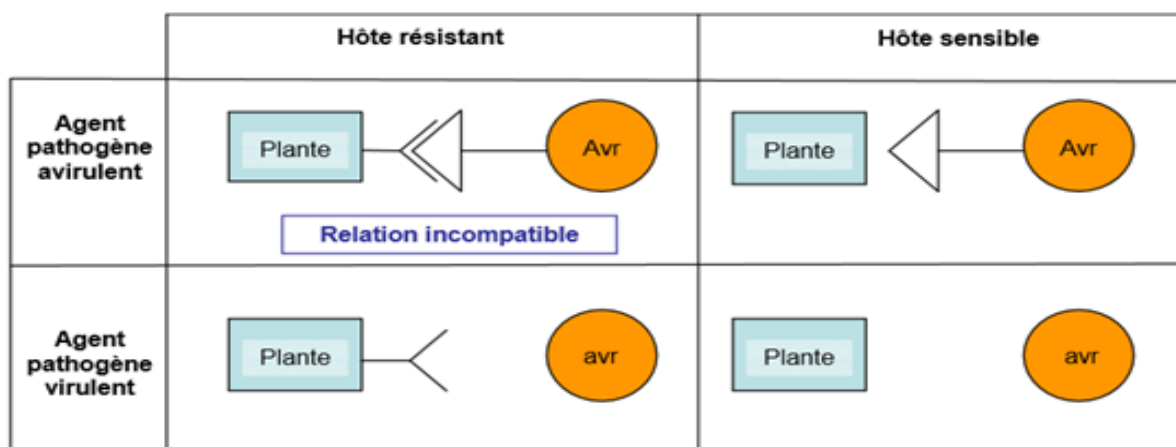
A. La résistance verticale (spécifique) : Généralement **monogénique** (un seul gène). Elle est totale mais très spécifique à une race particulière du pathogène. Elle est souvent instable dans le temps (contournement de résistance).

B. La résistance horizontale (générale) : Polygénique (plusieurs gènes). Elle ne bloque pas totalement l'infection mais réduit la vitesse de progression de la maladie. Elle est moins spécifique mais beaucoup plus stable et durable.

1.3. La relation gène pour gène (Théorie de Flor) :

Dans les années quarante, le biologiste américain Harold Flor (1942) a étudié les interactions du lin et de l'agent pathogène de la rouille du lin, le champignon *Melampsora lini*. Il est le premier à développer le concept de reconnaissance gène pour gène.

Ce concept postule que la résistance du lin à une race particulière de *Melampsora lini* se produit lorsque la plante porte un gène de résistance (**R**) **dominant** et que le champignon porte le gène d'avirulence (**Avr**) **dominant** correspondant. À l'inverse, la sensibilité se manifeste lorsque les gènes de résistance et d'avirulence sont sous des formes alléliques **récessives** (fig. 28).



Interactions entre les agents pathogènes et les plantes hôtes dans le cadre de la relation gène-pour-gène. L'interaction est incompatible lorsque la plante possède le gène de résistance et l'agent pathogène le gène d'avirulence correspondant : les produits de ces deux gènes interagissent directement tels un modèle « récepteur/éliciteur ». Dans tous les autres cas (absence du gène de résistance et/ou absence du gène d'avirulence), l'interaction est compatible et conduit à une réaction de sensibilité chez la plante.

Figure 28 : Relation gène pour gène

1.4. Les stratégies de défense chez les plantes :

Dans leur environnement, les plantes sont confrontées à des micro-organismes pathogènes tels que des virus, des bactéries, des oomycètes ou encore des champignons. Toutefois, les plantes

résistent efficacement à leurs agresseurs et développent rarement des symptômes sévères de maladies. Elles disposent de deux types de défense :

1.4.1. La défense passive (ou préformée) :

La première ligne de défense des plantes est constituée de barrières physiques et chimiques préexistantes qui s'opposent à l'intrusion des bioagresseurs.

A. Barrières physiques : La surface des organes aériens est protégée par la cuticule, une couche lipidique composée de cutine et de cires. Sous cette couche, la paroi pecto-cellulosique enveloppe chaque cellule. La présence de lignine dans certaines parois renforce cette protection; ce polymère phénolique complexe confère aux tissus une rigidité et une imperméabilité qui rendent les cellules difficilement pénétrables par les filaments fongiques et peu digestibles pour les insectes.

B. Barrières chimiques : En complément, de nombreuses plantes accumulent des **métabolites secondaires** aux propriétés antimicrobiennes ou répulsives. Parmi ces substances, on retrouve des alcaloïdes (comme la taxine de l'if), des terpénoïdes (tels que la digitoxine de la digitale pourpre) ou divers composés phénoliques.

Ces défenses passives constituent un obstacle majeur et suffisant pour repousser la grande majorité des micro-organismes environnants, expliquant pourquoi la plupart des plantes sont "non-hôtes" pour la plupart des pathogènes.

1.4.2. La défense active :

Certains micro-organismes parviennent à s'affranchir des défenses passives, en infectant la plante par des ouvertures naturelles telles que les stomates, par une blessure, ou encore via l'action d'enzymes hydrolytiques. Ces agresseurs peuvent soit dégrader la cuticule et la paroi cellulaire, soit neutraliser les molécules toxiques en les métabolisant.

De l'autre côté, les végétaux sont dotés d'un système de surveillance qui détecte l'intrusion des microbes et active des systèmes de défense. Pratiquement toutes les cellules vivantes des plantes sont dotées de ce double système de détection et d'activation. Ce système de défense met en jeu des événements cellulaires complexes conduisant à une résistance active vis-à-vis des micro-organismes pathogènes (fig. 29). Il se déroule en trois phases : reconnaissance, signalisation puis réactions de défense.

1.4.2.1. La reconnaissance :

La perception d'un agent pathogène implique la reconnaissance d'un éliciteur spécifique (reconnaissance spécifique = relation gène pour gène) ou non spécifique (reconnaissance générale). Le terme éliciteur a pour origine étymologique le verbe anglais to elicit : provoquer). On distingue deux types d'éliciteurs :

A. Les éliciteurs endogènes : ils sont appelés DAMPS (**D**amage **A**ssociated **M**olecular **P**atterns). Ce sont des molécules issues de la plante elle-même ; ils peuvent être libérés une fois que la cellule a été attaquée, notamment lors de la dégradation de la paroi cellulaire. Ce sont par exemple des fragments polysaccharidiques ou des oligogalacturonides provenant de la dégradation de la pectine.

B. Les éliciteurs exogènes : ce sont des motifs moléculaires appelés PAMPS (**P**athogen **A**ssociated **M**olecular **P**atterns). Ce sont soit des molécules provenant directement de l'agent pathogène comme les β -glucanes ou la chitine issue de la paroi des champignons agresseurs, la flagelline (constituant principal du flagelle bactérien), soit des molécules chimiques (éliciteurs abiotiques) comme les pesticides et les polluants.

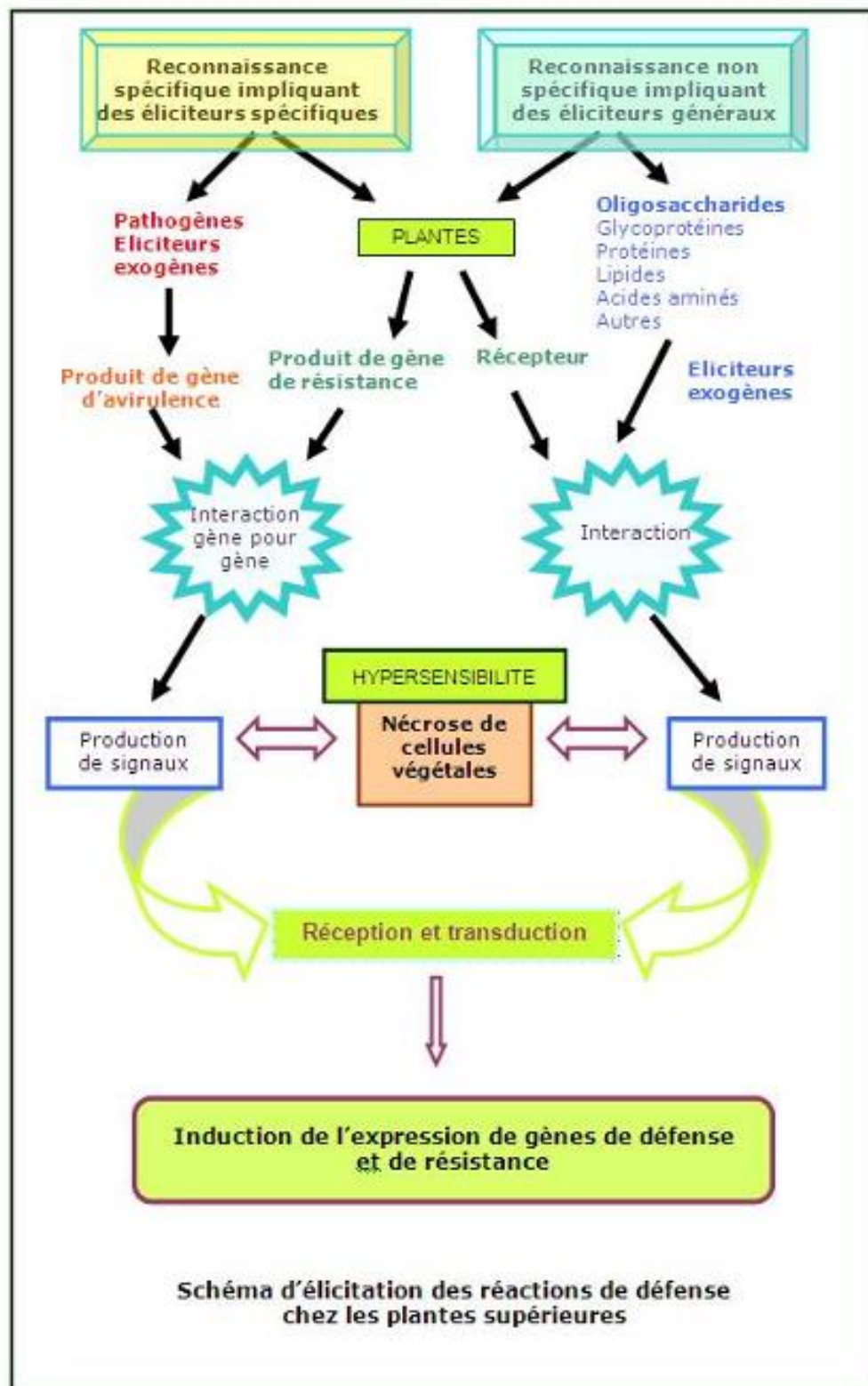


Figure 29 : Étapes de la défense active

1.4.2.2. La signalisation :

La reconnaissance de l'agent pathogène déclenche l'activation d'une cascade de signaux dans les cellules attaquées et la transmission de signaux d'alerte aux cellules environnantes et à la plante entière. Les principaux signaux sont :

A. Les flux ioniques : les réponses les plus précoces des cellules végétales se situent au niveau de la membrane plasmique où des modifications de perméabilité vont provoquer des efflux de K^+ , Cl^- et de nitrates et des influx massifs de Ca^{++} et de protons H^+ . L'influx de Ca^{++} et l'efflux de Cl^- sont, tous deux, responsables d'une acidification du cytoplasme. Cette dernière est considérée comme une étape clé dans l'établissement du stress oxydatif et dans la transduction du signal.

B. Le stress oxydatif : la production rapide de formes réactives de l'oxygène (Reactive Oxygen Species, ROS) est un phénomène qui se produit chez toutes les plantes qui ont subi une perturbation biologique ou une dégradation physique. Parmi les formes réactives de l'oxygène, on trouve les anions superoxyde (O_2^-) et le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) (fig. 30). Plusieurs études ont confirmé que le stress oxydatif est la plus rapide réaction de défense exprimée par une plante à l'attaque d'un pathogène grâce à une enzyme (NADPH-oxydase) localisée sur la membrane des cellules végétales. On attribue plusieurs rôles au H_2O_2 dans les mécanismes de défense des plantes :

- Il intervient dans les réactions liées à la mort de certaines cellules végétales : sa production semble nécessaire à la réaction d'hypersensibilité.
- Il peut être directement toxique pour le parasite : il joue le rôle d'antimicrobien.
- Il renforce également la paroi végétale : le mécanisme d'élicitation conduit parfois très rapidement à la polymérisation, en présence d' H_2O_2 , des protéines de la paroi végétale.
- Il participe au déclenchement de diverses réactions de défense (formation des protéines-PR et des phytoalexines).

Pour l'oxyde nitrique (NO), c'est une forme particulière de radical oxygéné qui est supposée agir en synergie avec les autres ROS pour induire la mort cellulaire lors de la HR car :

- Il ralentit la détoxification de H_2O_2 en inhibant la catalase et la peroxydase.
- D'autre part le NO possède un rôle dans la propagation de la mort cellulaire en favorisant la signalisation de cellule à cellule.

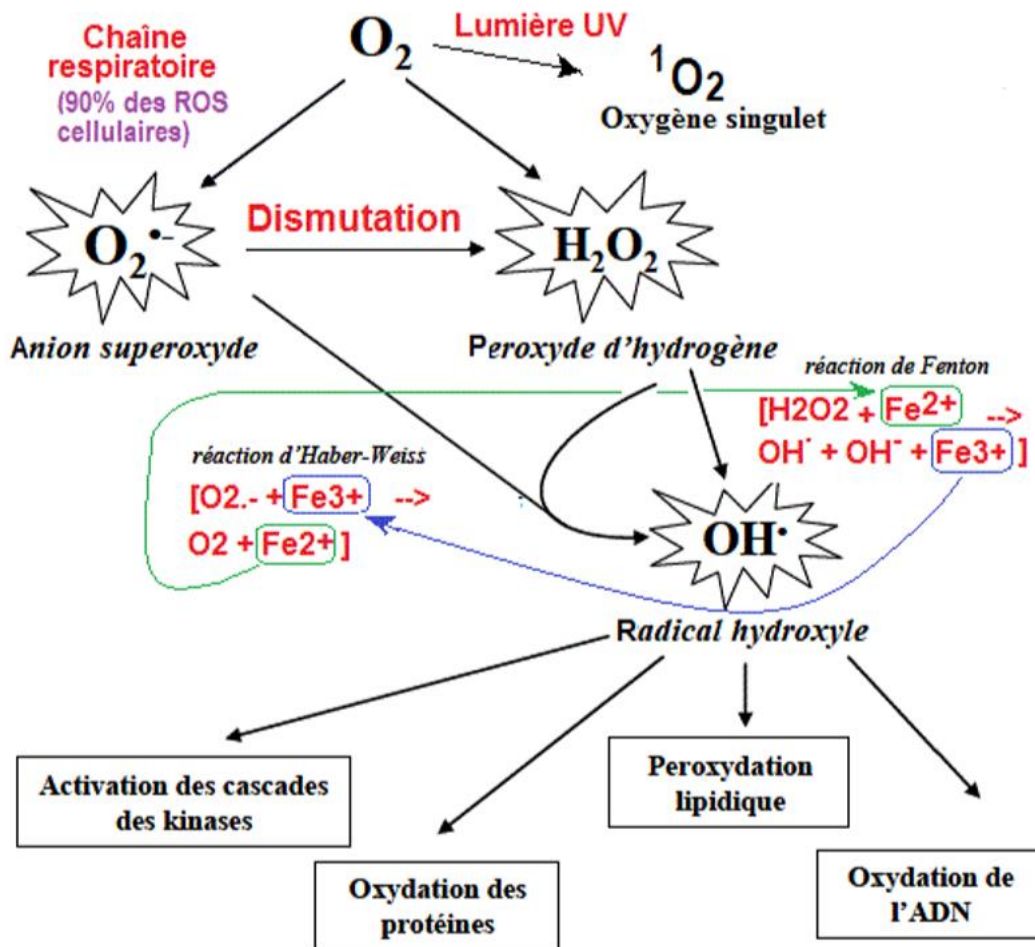


Figure 30 : Schéma des différentes formes de ROS

C. Modification des protéines par phosphorylation et déphosphorylation :

Les réactions de phosphorylation et de déphosphorylation des protéines jouent un rôle fondamental dans la transduction des signaux aboutissant au phénomène de résistance des plantes aux agents pathogènes. La grande majorité des protéines qui sont phosphorylées suite à la perception d'un signal de stress sont des protéines phosphokinasés ou MAPK (**Mitogen-Activated Protein Kinases**) qui sont engagées dans le processus de la liaison des éliciteurs à leurs récepteurs respectifs. Elles vont entretenir, par la suite, une phosphorylation en cascade jusqu'à ce que le signal soit transmis dans toute la cellule (fig. 31).

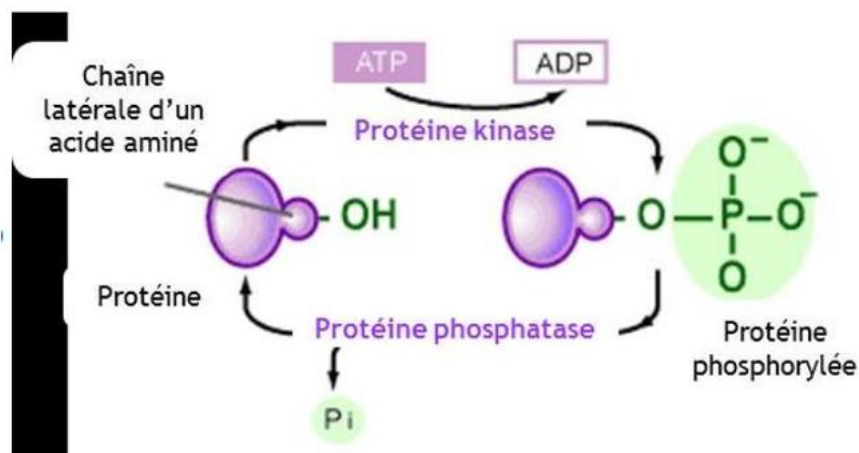


Figure 31 : Schématisation des mécanismes de phosphorylation/déphosphorylation.

Une protéine kinase transfère un groupement phosphate d'une molécule d'ATP sur la chaîne latérale d'un acide aminé, tandis que la protéine phosphatase le retire.

Rappel : Les protéines kinases sont des enzymes qui catalysent le transfert d'un groupe de phosphate de l'ATP sur l'hydroxyle (OH) des chaînes latérales des acides aminés ayant une fonction alcool (serine, thréonine et tyrosine) :



D. Les phytohormones : ce sont des composés essentiels à la régulation de processus biologiques variés comme la croissance et le développement. En plus, elles jouent un rôle dans les mécanismes de défense des plantes lors d'un stress. Les plus importants sont :

- **L'acide salicylique (SA) :** il dérive de l'acide cinnamique sous l'action de la PAL (phénylalanine ammonia-lyase). C'est une hormone impliquée dans la résistance aux pathogènes biotrophes. Sa présence est fortement associée à la mise en place de la résistance systémique acquise (SAR). Il stimule de nombreux gènes de défense dont des gènes codant des protéines PR. Il participe aussi localement aux mécanismes de la mort cellulaire en agissant sur des enzymes telles que la catalase (CAT) et la peroxydase (POX) qui modulent la production d'H₂O₂.
- **L'acide jasmonique (JA) :** Le JA et son ester méthylé, le méthyl jasmonate (MeJA), sont principalement synthétisés à partir de l'acide linoléique. La signalisation médiée par l'AJ est induite en réponse à des blessures et à des agents pathogènes nécrotrophes.

L'accumulation d'AJ et de méthyl jasmonate permet la transcription de gènes qui codent pour des protéines de défense. L'action de l'AJ s'exerce seule dans certains cas, ou nécessite l'intervention simultanée ou successive de l'éthylène, dans d'autres cas.

- **L'éthylène (ET) :** C'est une hormone végétale volatile synthétisée à partir de la méthionine. Il est capable de se déplacer par diffusion à partir de son site de synthèse. Il intervient dans la plante lors de la germination des graines, du mûrissement des fruits, du vieillissement des plantes et est également impliqué dans les mécanismes de défense des plantes aux stress abiotiques et biotiques. La voie de l'éthylène est impliquée dans la stimulation des protéines PR.

1.4.2.3. Les réactions de défense :

A. La réaction hypersensible (HR) :

Dès qu'une plante détecte un agent pathogène, elle met en place un des systèmes de défense naturelle les plus efficaces : une réaction d'hypersensibilité. Cette réaction violente et rapide, se manifeste souvent par l'apparition d'une petite tache nécrotique localisée sur le site de pénétration du parasite : les premières cellules végétales infectées meurent (fig. 32). Ce suicide de quelques cellules pour sauver la plante entière est suivi de l'expression de gènes de défense. La nécrose des cellules isole le pathogène et ralentit à la fois son développement et sa dispersion dans la plante.

Remarque : Cette réaction est plutôt efficace contre les agents pathogènes biotrophes qui vivent aux dépens des cellules vivantes, elle limite le développement de l'agent pathogène en réduisant l'accès aux nutriments. À l'inverse, la HR n'empêche pas mais facilite le développement des agents pathogènes nécrotrophes qui se nourrissent exclusivement de tissus morts.



Figure 32 : Réaction hypersensible (HR)

B. La résistance locale acquise (LAR) :

La LAR (Localized Acquired Resistance) se met en place en marge de la zone de la HR. Elle est caractérisée par une augmentation de la résistance des tissus adjacents au site d'infection (fig. 33). Elle est induite dans des tissus sains par les cellules en état de mort cellulaire via la transmission des molécules signales comme l'AS, l'AJ et l'éthylène (ET). La LAR provoque la synthèse de molécules ayant un fort pouvoir antimicrobien (phytoalexines, protéines PR...).

C. La résistance systémique acquise (SAR) :

C'est une forme de résistance qui s'exprime dans les parties non infectées de la plante, souvent éloignées des sites d'attaque (fig. 33). Cet état généralisé de résistance, proche de l'immunité animale, offre l'avantage de protéger la plante contre des infections ultérieures par une large gamme d'agents pathogènes.

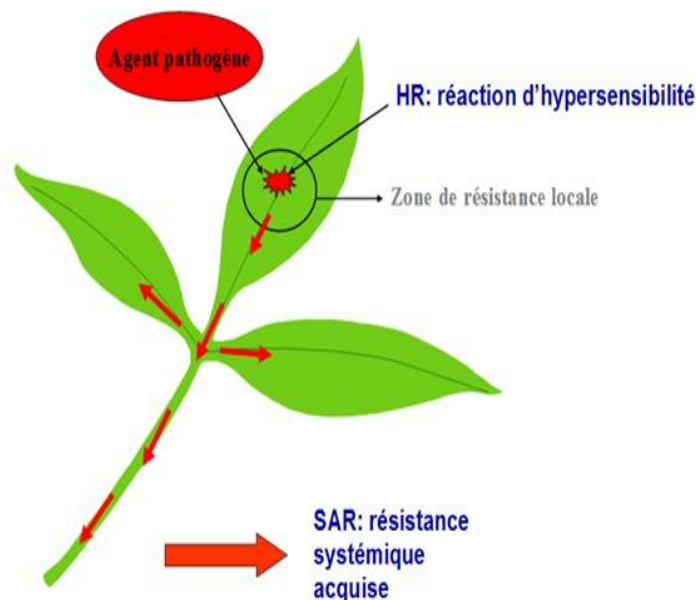


Figure 33 : Localisation de la HR, la LAR et la SAR

D. Renforcement de la paroi cellulaire :

La paroi cellulaire est une barrière physique naturelle très efficace face aux agresseurs qui synthétisent des enzymes et composés capables de la dégrader. Lors d'une infection par un agent pathogène cette paroi va être renforcée par des dépôts de composés phénoliques (lignines), d'esters tels que la subérine, de polysaccharides tel que la callose (fig. 34). Ces dépôts contribuent à la rigidification de la paroi que de nombreux micro-organismes sont alors

incapables de dégrader et de franchir. La formation des papilles est une réponse de défense très rapide se traduisant par l'apparition de zones d'épaississement sur la face interne de la paroi des cellules végétales au niveau des sites d'infection du pathogène. En fonction de la combinaison hôte pathogène, les papilles peuvent être formées essentiellement de callose ou aussi de lignine, de subérine, de cellulose ou de pectine.

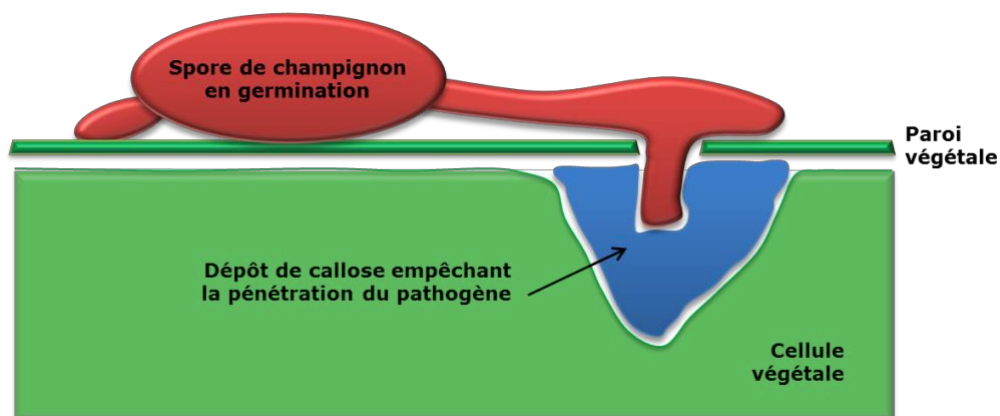


Figure 34 : Représentation schématique d'un champignon pathogène, dont la tentative de pénétration échoue grâce à un dépôt de callose au niveau de la paroi végétale.

E. Les protéines PR (Pathogenesis-Related proteins) :

Les protéines PR constituent un ensemble de protéines de défense synthétisées par les plantes en réponse à une attaque par des agents pathogènes (champignons, bactéries, virus) ou à des stress abiotiques. Elles sont généralement induites lors de la mise en place de la résistance systémique acquise (RSA) et peuvent s'accumuler localement ou dans toute la plante. Ces protéines présentent diverses activités biologiques, notamment des propriétés antifongiques, antibactériennes ou enzymatiques, comme les chitinases et les β -1,3-glucanases qui dégradent les parois des champignons. Leur rôle principal est de limiter la progression de l'agent pathogène et de renforcer les mécanismes de défense de la plante.

F. Les phytoalexines

Contrairement aux composés chimiques préformés, les phytoalexines sont des métabolites secondaires de faible poids moléculaire synthétisés de novo par la plante uniquement après une agression ou un stress. Elles sont considérées comme de véritables "antibiotiques végétaux". Leur biosynthèse est extrêmement rapide et localisée autour de la zone de pénétration du pathogène pour en limiter l'extension. La nature chimique des phytoalexines varie selon la famille botanique : on retrouve par exemple la **pisatine** chez le pois (Fabacées) ou le

resvératrol chez la vigne (Vitacées). Leur efficacité repose sur leur capacité à perturber le métabolisme ou l'intégrité cellulaire du parasite.

2. Diagnostic : Détection et identification des agents phytopathogènes :

Identifier l'agent responsable d'une maladie biotique est l'étape indispensable avant de pouvoir choisir les méthodes de lutte les plus appropriées pour le combattre. Les méthodes scientifiques sont basées sur l'observation et l'expérimentation.

2.1. L'observation :

L'observation constitue la première étape du diagnostic et se fait directement sur le terrain ou en laboratoire. Elle consiste à examiner attentivement les plantes malades afin d'identifier les **symptômes** (réactions de la plante) et les **signes** (présence visible de l'agent pathogène). Les symptômes peuvent inclure des taches foliaires, des chloroses, des nécroses, des flétrissements ou des déformations, tandis que les signes correspondent par exemple à la présence de mycélium, de spores ou d'exsudats bactériens. Cette observation peut être réalisée à l'œil nu, à la loupe ou au microscope, et permet d'orienter le diagnostic vers un type d'agent pathogène (champignon, bactérie, virus, etc.). Elle prend également en compte le contexte (conditions climatiques, stade de la plante, répartition des symptômes dans la parcelle).

2.2. L'expérimentation :

L'expérimentation permet de confirmer l'hypothèse issue de l'observation. Elle consiste à isoler et identifier précisément l'agent pathogène en laboratoire. Cela peut passer par la mise en culture sur milieux nutritifs, l'observation microscopique des structures, ou l'utilisation de techniques spécifiques comme les tests sérologiques (ELISA) ou moléculaires (PCR).

Une étape essentielle de l'expérimentation consiste à reproduire la maladie en inoculant l'agent pathogène suspecté à une plante saine, afin de vérifier qu'il provoque les mêmes symptômes. Cette démarche repose sur les principes des **postulats de Koch**, qui permettent d'établir avec certitude la relation de causalité entre un agent pathogène (champignon ou bactérie) et une maladie. Selon ces postulats :

1. L'agent doit être présent chez les plantes malades et absent chez les plantes saines.
2. L'agent doit pouvoir être isolé de plantes malades et multiplié en culture pure.

3. Lorsque l'agent pathogène en culture pure est inoculé à une plante saine, il induit des symptômes caractéristiques de la maladie.
4. L'agent pathogène initial doit pouvoir être réisolé à partir des plantes infectées expérimentalement.

Chapitre IV : Les méthodes de lutte

Objectifs :

Permettre à l'étudiant de comprendre et d'articuler les différentes stratégies de gestion des maladies des plantes, en l'amenant à analyser le rôle des aspects légaux, des pratiques culturales, de l'amélioration génétique de la résistance, de la lutte biologique et de la lutte chimique, afin de construire une approche intégrée et durable de la protection des végétaux.

1. Les aspects légaux de la lutte contre les maladies des plantes

La prise de décision en matière de protection phytopathologique s'inscrit aujourd'hui dans le cadre du concept de lutte intégrée, qui vise à combiner différentes méthodes de gestion des maladies de manière raisonnée et durable. Cette approche repose sur :

- L'observation régulière des cultures,
- L'évaluation des risques épidémiologiques et
- L'utilisation de seuils d'intervention pour décider du moment opportun d'agir.

Elle privilégie en priorité les méthodes préventives, telles que les pratiques culturales adaptées et les variétés résistantes, ainsi que les moyens biologiques, tout en limitant le recours aux traitements chimiques aux situations nécessaires. L'objectif est de maintenir les populations de pathogènes à un niveau économiquement acceptable, tout en réduisant les impacts sur l'environnement, la santé humaine et la biodiversité.

2. Les pratiques culturales et leurs effets sur les maladies des plantes :

Les pratiques culturales jouent un rôle déterminant dans le développement et la gestion des maladies des plantes. Elles regroupent un ensemble de techniques agronomiques visant à prévenir l'apparition et la propagation des agents phytopathogènes.

➤ Rotation des cultures :

La rotation des cultures permet de rompre les cycles des agents pathogènes, en particulier ceux du sol, en alternant des plantes hôtes et non hôtes (fig. 35).

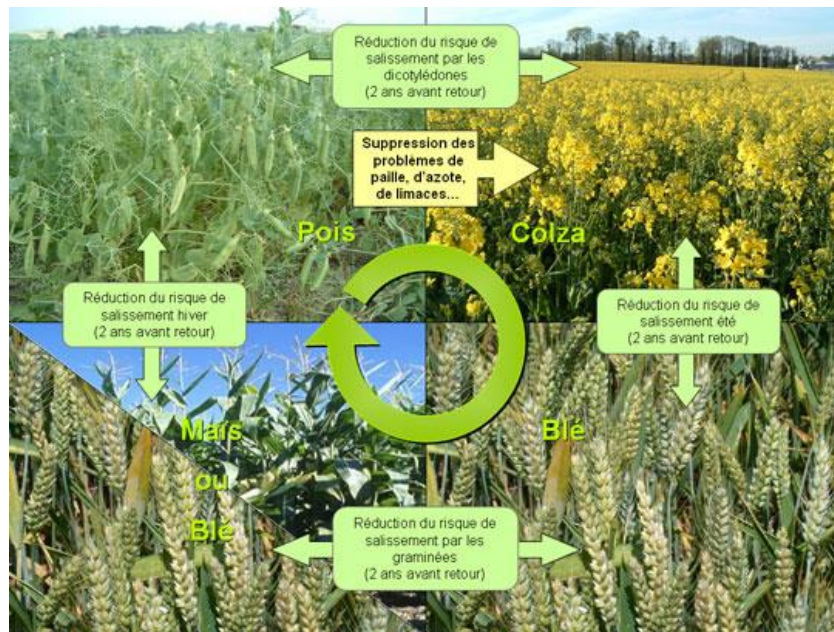


Figure 35 : Rotation des cultures

➤ **Gestion de l'eau et des engrais :**

Une gestion adéquate de l'irrigation (fig. 36a) limite l'excès d'humidité, souvent favorable aux maladies fongiques, tandis qu'une fertilisation équilibrée (fig. 36b) évite de rendre les plantes plus sensibles aux infections (par exemple, un excès d'azote favorise certains pathogènes) .



a : Gestion de l'irrigation



b : Gestion des engrais

Figure 36 : Gestion de l'irrigation et des engrais

➤ **Polycultures :**

La polyculture (fig. 37) consiste à cultiver plusieurs espèces végétales sur une même parcelle, ce qui favorise la biodiversité et réduit la propagation des maladies. En diversifiant les hôtes, cette pratique limite la transmission rapide des agents pathogènes et crée des barrières naturelles à leur diffusion. Elle contribue également à améliorer la résilience globale du système agricole, en diminuant les risques d'épidémies et en favorisant des interactions biologiques bénéfiques.

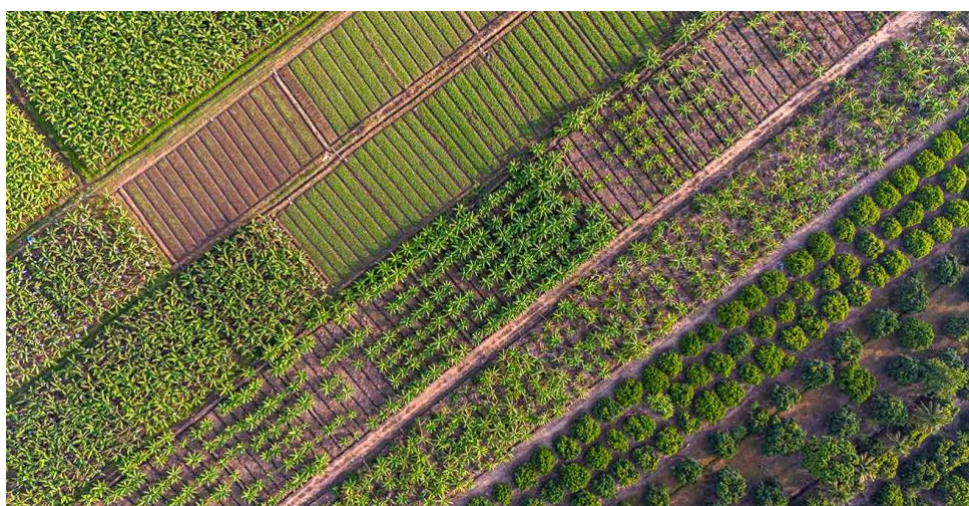


Figure 37 : Polyculture

3. L'amélioration génétique de la résistance aux agents phytopathogènes :

L'amélioration génétique de la résistance aux agents phytopathogènes consiste à développer des variétés végétales capables de mieux résister aux maladies grâce à la sélection et à la manipulation de leurs caractères héréditaires (fig. 38). Cette approche repose sur l'identification et l'introduction de gènes de résistance, soit par des méthodes classiques de sélection et de croisement, soit par des techniques modernes comme la sélection assistée par marqueurs et le génie génétique (fig. 39). Elle permet d'obtenir des plantes présentant une résistance spécifique ou durable contre certains pathogènes, réduisant ainsi les pertes agricoles et la dépendance aux produits phytosanitaires. Toutefois, cette résistance peut être contournée par l'évolution des agents pathogènes, ce qui nécessite une amélioration continue et une gestion intégrée des cultures.

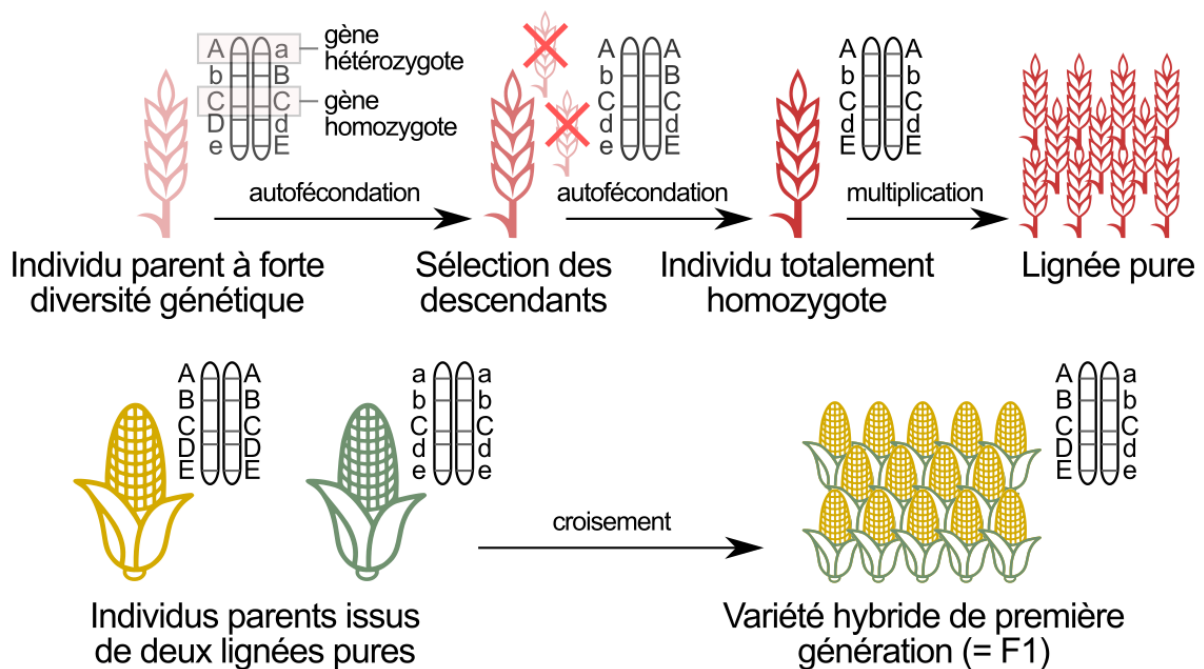


Figure 38 : La sélection classique

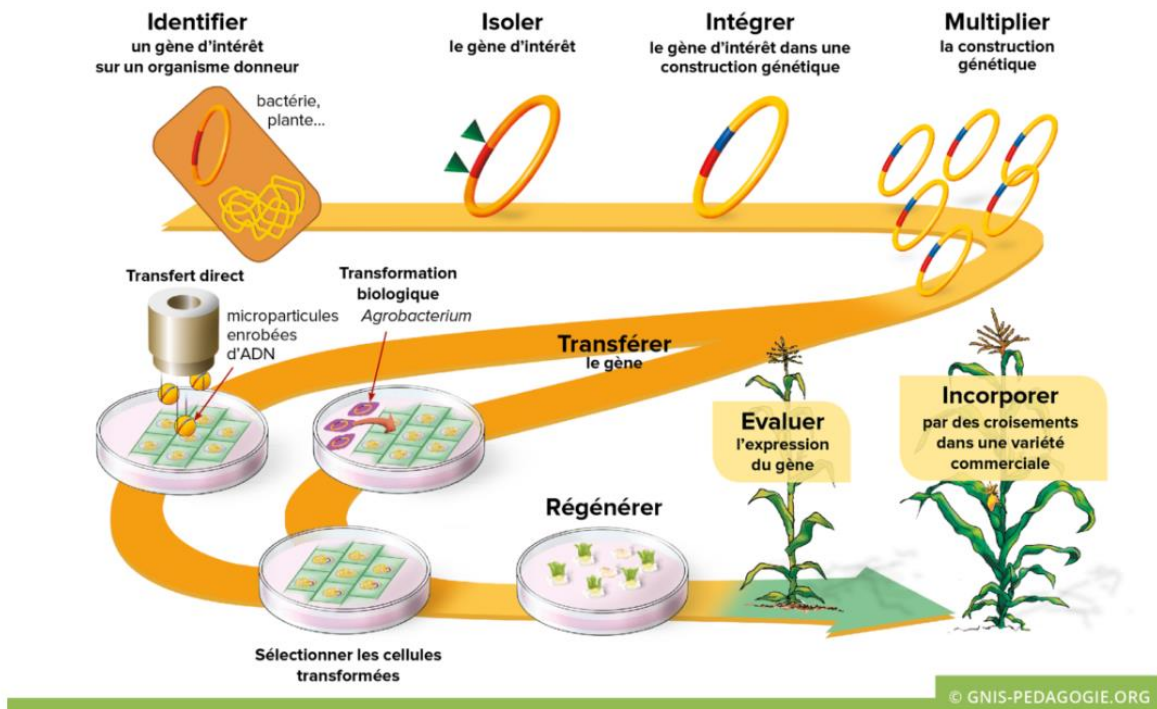


Figure 39 : La transgénèse

4. La lutte biologique :

Selon la définition de l'Organisation Internationale de Lutte Biologique, la lutte biologique correspond à « l'utilisation d'organismes vivants pour prévenir ou réduire les dégâts causés par des ravageurs ». Les organismes utilisés, appelés auxiliaires, peuvent être des prédateurs, des parasitoïdes ou des micro-organismes antagonistes.

Cette définition peut être élargie à l'utilisation de produits issus d'organismes vivants possédant une activité antagoniste vis-à-vis des bioagresseurs des plantes. Ainsi, la lutte biologique repose sur l'utilisation d'organismes vivants ou de leurs produits pour limiter les dommages causés aux cultures.

Elle peut être appliquée contre divers ennemis des plantes, tels que les insectes ravageurs, les adventices et les agents pathogènes. Contrairement à la lutte chimique, elle ne vise pas à éradiquer les populations nuisibles, mais à les maintenir en dessous d'un seuil de nuisibilité, c'est-à-dire le niveau à partir duquel les pertes de rendement deviennent significatives.

4.1. Utilisation des auxiliaires :

Les auxiliaires de cultures sont des parasites ou des prédateurs des bio-agresseurs des plantes. Selon leur mode d'action, il est possible de distinguer :

A. Les auxiliaires parasitoïdes : il s'agit d'insectes dont les larves se développent dans ou au contact d'insectes ravageurs à différents stades de leur développement et conduisant à leur mort. Ex : *Aphidius colemani* contre les pucerons (fig. 40).

B. Les auxiliaires prédateurs : ce sont des insectes ou des acariens dont les larves et parfois les adultes consomment les insectes ravageurs ou des plantes adventices. Ex : *Ambleysius swirski* est très efficace contre les jeunes larves de diverses espèces de thrips et les œufs et larves d'aleurodes ; les larves d'*Adalia bipunctata* sont utilisées contre les pucerons (fig. 41).

C. Les auxiliaires pathogènes : il s'agit de microorganismes se comportant comme des agents pathogènes d'insectes ravageurs, d'agents pathogènes ou de plantes adventices des cultures. Ex : le virus de la Polyédrose nucléaire est utilisable pour lutter contre les chenilles de noctuelle du chou, *Bacillus thuringiensis* dont plusieurs souches spécifiques sont efficaces contre différentes espèces de Lépidoptères ((fig. 42), le genre *Trichoderma* (un champignon du sol) contrôle avec succès le développement de *Botrytis cinerea* sur les grappes de raisin, les fraises, les pommes et les tomates.

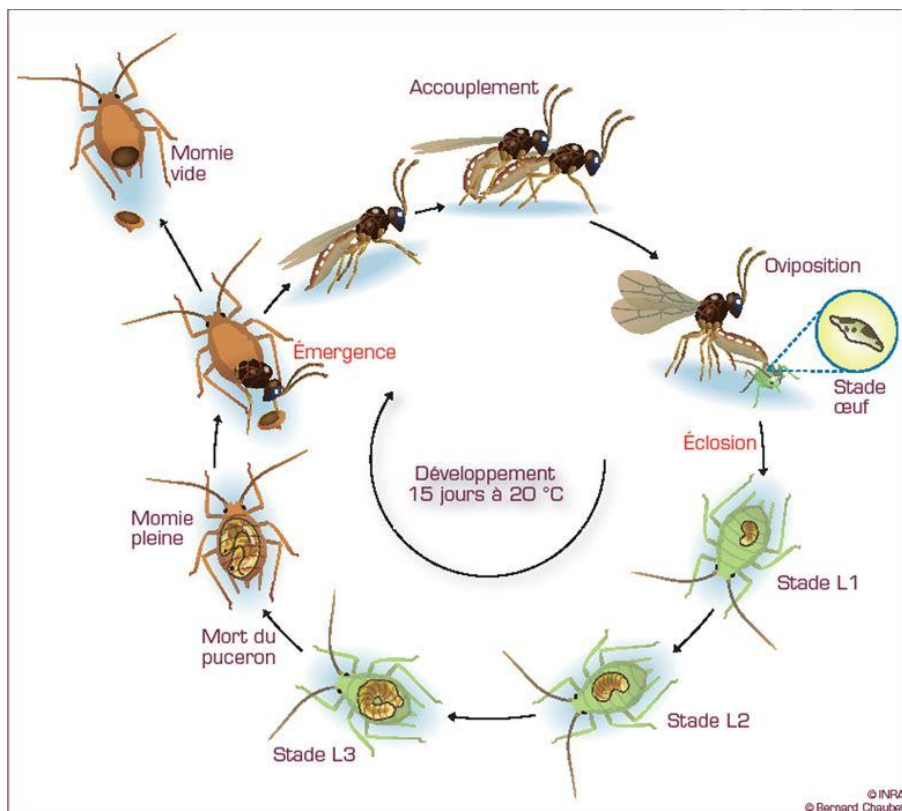


Figure 40 : Utilisation du parasitoïde *Aphidius colemani* contre les pucerons



Figure 41 : Utilisation de la coccinelle contre les pucerons

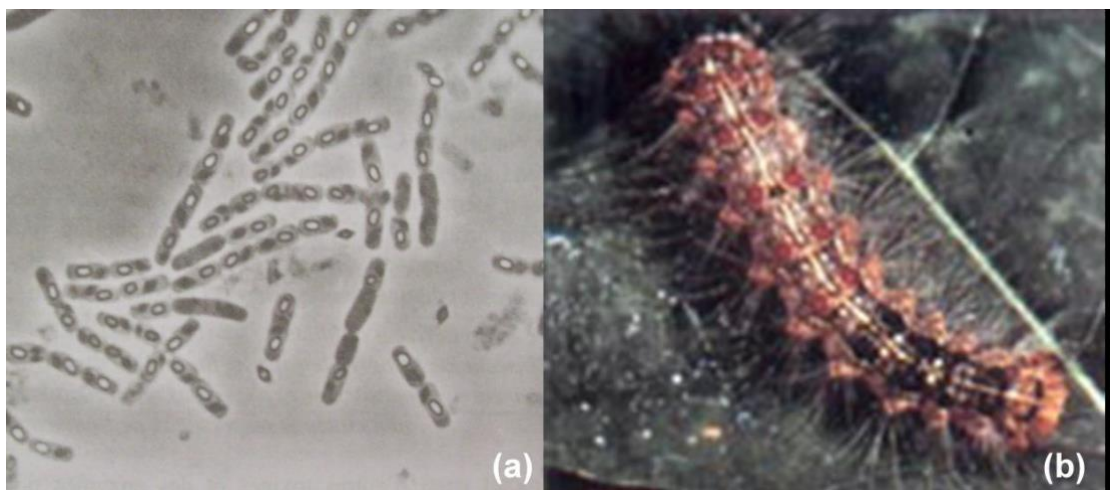


Figure 42 : Utilisation du *Bacillus thuringiensis* Berliner (a) contre la chenille du bombyx disparate (*Lymantria dispar* Linnaeus)

4.2. Utilisation des extraits végétaux :

Les extraits végétaux sont des substances naturelles extraites de plantes selon différents procédés. Ces extraits présentent des propriétés :

- **Insecticides :** il s'agit par exemple du purin d'ortie contre les pucerons, de la roténone contre les doryphores et de la décoction de tanaïs contre pucerons, chenilles et aleurodes,
- **Fongicides :** comme le purin de prêle et l'infusion d'ail et d'oignon contre les maladies cryptogamiques (mildiou, rouille).
- Certains extraits ont par ailleurs la capacité de renforcer les défenses naturelles des plantes comme le purin d'ortie ou la décoction de prêle.

Les composés à l'origine de ces propriétés diverses sont des composés issus du métabolisme secondaire des plantes et font partie de trois grandes familles : les alcaloïdes (comme la nicotine), les polyphénols (comme les flavonoïdes, dérivés d'acide caféique et les stilbènes), les terpènes et dérivés (eucalyptol, thymol, artémisinine, saponine...)

4.3. Les stimulateurs de défense naturelle (SDN) :

La mise en évidence d'éliciteurs dans les interactions plante/agent pathogène a conduit au développement de ces spécialités phytosanitaires appelées Stimulateurs de Défense Naturelle (SDN), qui miment l'action des éliciteurs et qui permettent de protéger préventivement la plante contre un ensemble de bio-agresseurs. Exemples :

Iodus 40 : contient un principe actif naturel (la *laminarine*) extrait de l'algue brune laminaire (*Laminaria digitata*). Iodus 40 est homologué sur le blé et l'orge contre l'oïdium et la septoriose.

Stifénia : (contient des extraits de fenugrec). Il est homologué sur la vigne contre l'oïdium.

5. La lutte chimique :

La lutte chimique consiste à utiliser des produits phytopharmaceutiques ou phytosanitaires (comme les insecticides, les fongicides et les herbicides), issus de la chimie de synthèse pour combattre les organismes nuisibles (fig. 43).

La lutte chimique s'est développée dans les pays occidentaux après la seconde guerre mondiale, grâce aux progrès de la chimie. Elle permet d'augmenter significativement les rendements agricoles, assurant ainsi une autosuffisance alimentaire.

La lutte chimique peut être utilisée en tant que lutte prophylactique, c'est-à-dire en prévention contre les organismes nuisibles, ou en lutte curative, qui consiste en un emploi rationnel de préparations phytopharmaceutiques (choix de produits les moins polluants, doses précises,...). Pour que cette méthode de lutte soit efficace, il faut connaître le type de ravageur contre lequel on veut lutter et son mode de développement, ainsi que les différentes spécialités de produits phytosanitaires afin de choisir le plus adapté.



Figure 43 : Utilisation des produits phytosanitaires

Conclusion

La phytopathologie constitue une discipline essentielle pour comprendre les interactions entre les plantes, les agents pathogènes et leur environnement. Elle permet d'identifier les causes des maladies végétales et d'analyser leurs mécanismes de développement, ainsi que les stratégies de lutte adaptées pour en limiter les impacts. Compte tenu de l'importance économique des plantes, notamment dans la production agricole, l'alimentation humaine et animale ainsi que dans diverses industries, la maîtrise de cette discipline est indispensable pour réduire les pertes et assurer une production durable.

À l'issue de ce module, les étudiants auront acquis une vision globale de la phytopathologie. Ils seront capables de reconnaître certaines maladies des plantes, d'en réaliser un diagnostic de base et de proposer des méthodes de traitement appropriées.

Références bibliographiques:

Benhamou, N. (2009). *La résistance chez les plantes : principes de la stratégie défensive et applications agronomiques*. Tec & Doc – Lavoisier, Paris.

Benhamou, N., and Rey, P. (2012). Stimulateurs des défenses naturelles des plantes : une nouvelle stratégie phytosanitaire dans un contexte d'écoproduction durable : I. Principes de la résistance induite. *Phytoprotection* 92, 1. Doi :10.7202/1012399ar.

Doucet, R. (2008). *Les plantes agricoles et leurs maladies*. Berger, Paris.

Flor, H. H. (1942). Inheritance of pathogenicity in *Melampsora lini*. *Phytopathology* 32:653-669.

Jones JD, Dangl JL. (2006). The plant immune system. *Nature*. Nov 16 ; 444(7117) : 323-9. Doi : 10.1038/nature05286. PMID : 17108957.

Lepoivre, P. (2003). *Phytopathologie : bases moléculaires et biologiques des pathosystèmes et fondements des stratégies de lutte*. De Boeck Université / Presses agronomiques de Gembloux, Bruxelles.

Nasraoui B. (s.d.). *Phytopathologie : Support de cours*. Université de Carthage ; Tunisie.

Regnault-Roger, C., Philogène, B. J. R., & Vincent, C. (2008). *Biopesticides d'origine végétale*. Lavoisier, Paris.

Regnault-Roger, C. (2014). *Produits de protection des plantes : Innovation et sécurité pour une agriculture durable*. Tec & doc.

Van Der Plank, J. E. (1965) Dynamics of Epidemics of Plant Disease, *Pest Articles & News Summaries*. Section B. Plant Disease Control, 11:3, 307-317, DOI: 10.1080/05331846509432193