



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi B.B.A

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم البيولوجية

Département des Sciences Biologiques

Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Microbiologie Appliquée

Thème

**Principales phytopathologies d'origines
bactériennes et moyens de lutte**

Présenté par : SAADAoui Malika

MERDJI Hafidha

Devant le jury :

Président : M^{me} TAMINE Milouda MAB (Université B.B.A.)

Encadrant : M^{me} ZERROUG Amina MCB (Université B.B.A.)

Examineur : M^{me} SOUAGUI Yasmina MCB (Université B.B.A.)

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu (notre dieu) qui nous a donné

La santé, la volonté, le courage et la patience tout au

Long de nos études.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu

Voir le jour sans l'aide et l'encadrement de

Mme Zerroug Amina,

On la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa

Patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de

ce mémoire.

On tient à présenter nos sincères remerciements à tous les membres du

jury :

M^{me} TAMINE Milouda de nous avoir fait l'honneur

de présider le jury.

M^{me} SOUAGUI Yasmina d'avoir pris le temps d'examiner

Enfin, nos profonds remerciements s'adressent à toutes

les personnes ayant contribué de près ou de loin

à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je remercie, tout d'abord, Dieu le tout puissant, pour avoir guidé mes pas vers un avenir
inchaallah prometteur, où le travail, la persévérance et la quête du savoir seront ma
devise.

Je dédie ce travail à mes chers parents :

A ma chère maman ... Que j'adore beaucoup

Et à mon cher papa... Que j'aime tant,

Sans vous, je ne serai jamais arrivée là où j'en suis.

A mes frères et a ma niece mignonne : Maram

A mon très chère encadrant : Mme Zerroug Amina

A Mes très chères amies ceux qui sont proches de mon cœur

J'adresse à tous un grand merci pour tout.

Malika

Dédicaces

En guise de reconnaissance, je dédie ce modeste travail

À mon père

À ma mère

À ma sœur et mes frères

À toute ma famille

A mon très chère encadrant : Mme. Zerroug Amina

J'adresse à tous un grand merci pour tout.

Hafidha

Sommaire

المخلص

Résumé

Abstract

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction.....01

Chapitre I : Généralités sur la phytopathologie

I.1. Historique de la phytopathologie.....03

I.2. Les maladies des plantes.....04

I.2.1. Définition.....04

I.2.2. Les maladies non infectieuses.....04

I.2.3. Les maladies infectieuses.....05

Chapitre II : Les bactéries intervenant dans les phytopathologies

II.1. Définition.....06

II.2. Les principaux taxons et maladies provoquées par les bactéries phytopathogènes.....06

II.3. Les dix principales bactéries phytopathogènes.....08

II.4. Les interactions entre les plantes et les microorganismes.....09

II.5. Mode d'action des bactéries phytopathogènes–typologie des symptômes.....10

II.6. Impact socio-économique des bactérioses des plantes.....13

II.6.1. Perturbations de la production agricole.....13

II.6.2. Impact sur l'environnement.....13

II.6.3. Santé de l'homme et de l'animal.....14

II.7. Le diagnostic des bactérioses.....15

II.7.1. Techniques bactériologiques.....16

II.7.2. Résistance aux antibiotiques17

II.7.3. Identification des bactéries par profils d'acides gras17

II.7.4. Techniques immunologiques	17
II.7.4.1. Méthodes d'immunofluorescence.....	17
II.7.4.2. Méthodes immunoenzymatiques	18

Chapitre III : Les moyens de lutte contre les maladies des plantes

III. Les moyens de lutte contre les maladies des plantes.....	19
III.1. La lutte biologique.....	19
III.1.1. Définition.....	19
III.1.2. Principes de la lutte biologique.....	19
III.1.3. Rôle de PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobactéria).....	19
III.1.4. Mécanismes d'action d'un agent de lutte biologique.....	20
III.1.4.1. Compétition.....	20
III.1.4.2. Parasitisme.....	21
III.1.4.3. Anabiose.....	21
III.1.4.4. Induction des systèmes de résistance de la plante hôte.....	21
III.1.5. Agents de lutte biologique.....	22
III.1.6. Les avantages et les inconvénients de la lutte biologique.....	23
III.1.6.1. Les avantage.....	23
III.1.6.2. Les inconvénients.....	23
III.2. La lutte chimique.....	23
III.2.1. Composés agissant directement sur les parasites.....	24
III.2.1.1. Matières actives multisites.....	24
III.2.1.2. Produits affectant le métabolisme des acides nucléiques, des protéines ou de leurs précurseurs.....	24
III.2.2. Composés à action indirecte sur les parasites.....	25
III.2.3. Les inconvénients de la lutte chimique.....	25
III.2.3.1. Effets sur la santé humaine.....	26
III.2.3.2. Effets sur l'environnement.....	26
III.3. La lutte physique.....	26

III.4. La lutte génétique.....	27
III.5. Méthode culturale.....	27
Conclusion.....	28
Références bibliographiques.....	29

الملخص

يمكن أن تحدث أمراض النبات بسبب الظروف البيئية غير المواتية المتعلقة بالمناخ والتغذية والتلوث أو بسبب العوامل الطفيلية، من بينها البكتيريا مثل *Erwinia amylovora*, *Xanthomonas campestris*, *Pseudomonas syringae* وما إلى ذلك. تؤثر البكتيريا المسببة للأمراض النباتية على مجموعة واسعة من المحاصيل حول العالم وتؤثر سلبيًا على الزراعة بسبب الخسائر الاقتصادية والآثار البيئية المرتبطة بها. لذلك يتم إجراء الكثير من الأبحاث في هذا المجال من أجل تعميق معرفتنا بأمراض النبات ولنكون قادرين على تطوير استراتيجيات ووسائل السيطرة لمنع أو الحد من الأضرار التي تسببها مسببات الأمراض على المحاصيل، تتوفر طرق مختلفة. يمكن تصنيف القياسات المستخدمة على أنها طرق بيولوجية، فيزيائية، ميكانيكية وكيميائية. يتم تطبيق كل هذه التقنيات لاستبعاد مسببات الأمراض النباتية، أو القضاء على أو تقليل لفاح المرض، أو تحصين أو تحسين مقاومة النباتات ضد مسببات الأمراض.

الكلمات المفتاحية: أمراض النبات، البكتيريا الممرضة للنبات، وسائل مكافحة.

Résumé

Les maladies des plantes peuvent être causées par des conditions environnementales défavorables liées au climat, à la nutrition et à la pollution ou par des agents parasites, parmi eux les bactéries telles que *Pseudomonas syringae*, *Xanthomonas campestris*, *Erwinia amylovora*, etc. Les bactéries phytopathogènes affectent un large éventail de cultures dans le monde et ont un impact négatif sur l'agriculture en raison des pertes économiques et des impacts environnementaux qui leur sont associés. De nombreux travaux de recherche sont donc menés dans ce domaine afin d'approfondir les connaissances sur les maladies des plantes et de pouvoir développer des stratégies et des moyens des luttés. Pour empêcher ou limiter les dégâts causés par les pathogènes sur les cultures, différentes approches sont disponibles. Les mesures utilisées peuvent être classées comme des méthodes biologiques, physiques et mécaniques, et méthodes chimiques. Toutes ces techniques sont appliquées pour exclure les pathogènes des plantes, éradiquer ou réduire les inocula des pathogènes, immuniser ou améliorer la résistance des plantes contre ces pathogènes.

Mots clés : Les maladies phytopathologiques, Les bactéries phytopathogènes, Les moyens de lutte.

Abstract

Plant diseases can be caused by unfavorable environmental conditions related to climate, nutrition and pollution or by parasitic agents, among them bacteria such as *Pseudomonas syringae*, *Xanthomonas campestris*, *Erwinia amylovora*, etc. Plant pathogenic bacteria affect a wide range of crops around the world and negatively impact agriculture due to the economic losses and environmental impacts associated with them. Much research is therefore carried out in this field in order to deepen our knowledge of plant diseases and to be able to develop strategies and means of control. To prevent or limit the damage caused by pathogens on crops, different approaches are available. The measurements used can be classified as biological, physical, mechanical and chemical methods. All these techniques are applied to exclude plant pathogens, eradicate or reduce pathogen inocula, immunize or improve the resistance of plants against these pathogens.

Keywords: Phytopathology diseases, Phytopathogenic bacteria, control methods.

Liste des abréviations

ELISA : Enzyme Linked-Immuno-Sorbent Assay

HR: Hypersensitive Response

IAA: Indole-3-Acétique Acide

ISR: Induced Systemic Resistance

PGRP: Plant growth promoting rhizobacteria

pv: Pathovar

Spp : Espèces

Subsp : Sous-espèce

Liste des figures

Figure 1 : Conditions influençant le développement des maladies.....	05
Figure 2 : Schématisation de l'interaction entre une plante et des bactéries pathogènes et symbiotiques.....	10
Figure 3 : Les symptômes causés par différentes bactéries phytopathogènes.....	12
Figure 4 : Les principales étapes du diagnostic d'un agent phytopathogène.....	15

Liste des tableaux

Tableau 1 : Présentation générale des causes de maladies chez les plantes.....	04
Tableau 2 : Top 10 des agents phytopathogènes bactériens. Le tableau représente la liste classée des bactéries votée par les bactériologistes végétaux associés à la revue <i>Molecular Plant Pathology</i>	08
Tableau 3 : Les agents de lutte biologique commercialisés pour la lutte contre les agents pathogènes du sol, de la phyllosphère et de post-récolte.....	22

Introduction

Introduction

Les maladies parasitaires des plantes sont causées par l'action d'agents pathogènes (virus, phytoplasmes, bactéries, champignons, protozoaires, les phanérogames parasites, etc...). Ces parasites sont généralement infectieux car ils envahissent l'hôte et s'y multiplient et sont contagieux, par leur transmission d'une plante infectée à une plante saine (**Lepoivre, 2003**).

Les bactéries sont capables de provoquer des maladies dans un large éventail de plantes dans le monde entier. Ces organismes, appelés bactéries phytopathogènes, affectent toutes les plantes vivrières, colonisant soit leur surface, soit leurs tissus. Ils provoquent des symptômes tels que des taches, des brûlures, des chancres, des pourritures des tissus et/ou des déséquilibres hormonaux qui entraînent une prolifération des plantes, un rabougrissement, une ramification des racines et une épinastie des feuilles, entre autres. Ces problèmes ont un impact sur les plantes à un niveau qualitatif et quantitatif, affectant négativement les approvisionnements alimentaires mondiaux (**Kannan et al., 2015**).

Les maladies bactériennes des plantes causent des dommages dévastateurs aux cultures et des pertes économiques importantes. Collectivement, ils causent des pertes de plus d'un milliard de dollars dans le monde chaque année à la chaîne de production alimentaire (**Mansfield et al., 2012 ; Kannan et al., 2015**). Avec d'autres phytopathogènes, tels que les champignons et les virus, et les facteurs de stress abiotiques, notamment la dégradation de l'environnement, le changement climatique et la pollution chimique, les phytopathogènes bactériens constituent une menace mondiale pour la production alimentaire agricole.

La lutte contre les maladies des plantes est basée sur différentes méthodes. La plupart de ces méthodes est orientée pour protéger les plantes saines des maladies plutôt que de guérir les plantes malades. Seules quelques infections peuvent être contrôlées d'une façon satisfaisante après que les plantes deviennent malades. Les méthodes de lutte appliquées en agriculture varient considérablement d'une maladie à une autres en fonction du pathogène, de la plante hôte et de leur interaction chacun avec l'autre et avec l'environnement. Le but final de toutes les méthodes utilisées est de combattre les maladies des plantes et alors d'accroître la quantité et améliorer la qualité de la production agricole (**Nasraoui, 2006**).

L'objectif général de notre travail est de comprendre et de connaître les principes de la phytopathologie d'origine bactérienne et les moyens de lutttes contre ces maladies, dans ce sens notre travail s'est divisé en trois chapitres, le premier a été consacré à des généralités sur les maladies phytopathologiques, le deuxième aux bactéries phytopathogènes, leur mode d'action et les méthodes utilisées pour le diagnostic, et le troisième aux moyens du lutttes contre ces maladies.

Chapitre I.
Généralités sur la phytopathologie

I.1. Historique de la phytopathologie

Les maladies des plantes sont aussi vieilles que l'agriculture. En effet, dès son origine, l'agriculture créa des conditions favorables aux maladies des plantes cultivées concentrant des populations de plantes sur des surfaces limitées et en effectuant des cultures successives de la même plante (**Lepoivre, 2003**).

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à comprendre l'origine des maladies des plantes cultivées afin de mieux les éviter ou les combattre. Effectivement, celles-ci sont à l'origine de pertes de rendement qui entraînent des pertes économiques, voire des famines. Le cas le plus célèbre est celui de l'introduction en Europe en 1844 de *Phytophthora infestans*, agent du mildiou de la pomme de terre, puis de la grande famine Irlandaise de 1845 à 1852, qui fit près d'un million de morts et poussa deux millions d'Irlandais à émigrer vers d'autres continents (**Semal, 1982**).

Les causes de la plupart des maladies des plantes ne furent identifiées qu'au cours des périodes récentes parce que les anciennes civilisations, et malgré leur conscience très nette de l'existence de maladies chez les végétaux cultivés, attribuaient ces phénomènes à des causes divines et envisageaient essentiellement comme moyen de lutte des incantations magiques ou des cérémonies destinées à apaiser les dieux (**Lepvoivre, 2003**).

Le premier écrit scientifique sur les maladies a été présenté par Théophraste qui a vécu en Europe de 370 à 286 avant J.-C. (**Agrios, 2005**) où il tenta d'établir une relation entre les maladies des plantes, la marche des corps célestes et les facteurs du climat. Après la naissance de l'Islam, en Arabie au VIIe siècle, Les conquêtes de Perse et de l'Espagne ont influencé la phytopathologie médiévale. Ibn al-Awwam de Séville (mort vers 1185) auteur de « Kitab al-filaha », décrit de nombreuses maladies de la vigne et des arbres fruitiers comme la cloque de feuille du pêcher et il préconise de nombreux remèdes (cendres, vinaigre, tourteau d'olives) ainsi que des méthodes prophylactiques (la scarification pour expurger la mauvaise sève). Ibn al-Bassal (XIIe siècle) parle des germes du mal qui atteignent les arbres (**Jousse, 2006**).

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 (**Semal, 1982**).

I.2. Les maladies des plantes

I.2.1. Définition

La phytopathologie 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**). Une maladie se définit comme une anomalie dans la structure ou la fonction d'une plante causée par un facteur irritant continu (**Schiffers et Moreira, 2011**). Les maladies des plantes peuvent réduire la valeur économique, esthétique et biologique de toutes les espèces. Elles peuvent être divisées en deux principaux groupes : les maladies non infectieuses (ou abiotiques) et les maladies infectieuses (ou biotiques) (tableau 1).

Tableau1 : Présentation générale des causes de maladies chez les plantes (**Lepoivre, 2003**).

Agents non infectieux (physiques-chimiques) (maladies abiotiques)	
Climat	Froid, chaud, sécheresse, excès de précipitation, grêle, foudre, vent, neige
Nutrition	Déséquilibres, carences, excès, pH, salinité, toxiques naturels.
Pollution	Atmosphère (SO ₂ , F, etc.), sols, eaux (nitrate, pesticides), poussières industrielles
Agents infectieux (maladies biotiques)	
Molécules	Virus, viroïdes.
Cellules ou organismes pluricellulaires	Bactéries, phytoplasmes, protozoaires, champignons, phanérogames.

I.2.2. Les maladies non infectieuses

Elles sont causées par des conditions environnementales inadéquates telles que les carences ou les excès de nutriments, les conditions défavorables du sol et du climat et les polluants (**Lepoivre, 2003**). Ces maladies ne peuvent être transmises à des plantes saines.

I.2.3. Les maladies infectieuses

Elles sont causées par des micro-organismes tels que les champignons, les bactéries, les virus et les viroïdes (**Lepoivre, 2003**). Elles peuvent être transmises par divers vecteurs (vent, eau, contacts entre végétaux, insectes, homme etc.) à d'autres plantes saines, ou être présents dans le sol, provoquant ainsi la maladie chez les nouveaux hôtes sensibles. Selon **Schiffers et Moreira (2011)**, les maladies infectieuses des plantes ne se développent que si les trois conditions suivantes sont remplies (figure 1) :

a. La plante hôte doit être sensible (et/ou « sensibilisée ») : La sensibilité d'une plante dépend de l'état des cellules et des tissus des plantes avant l'infection (la résistance passive) et la faculté des cellules de réagir d'une manière particulière à un agent pathogène (la résistance active).

b. L'agent pathogène doit être virulent et capable d'attaquer la plante : le plus important facteur de la virulence d'un agent pathogène est sa faculté de produire des enzymes et des toxines, et de les transmettre à la plante.

c. L'environnement doit favoriser le développement de la maladie : les facteurs du milieu environnant (température, lumière, éléments nutritifs et spécialement l'azote disponible dans le sol, densité, port des plantes, etc.) influencent largement à la fois la sensibilité de la plante et la virulence de l'agent pathogène (**Schiffers et Moreira, 2011**).

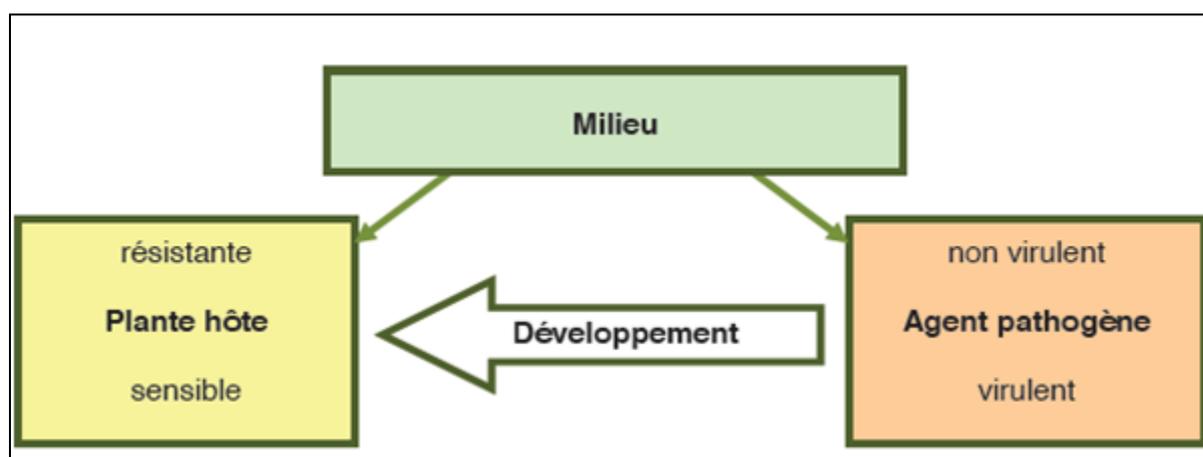


Figure 1 : Conditions influençant le développement des maladies (**Schiffers et Moreira, 2011**).

Chapitre II.

Les bactéries intervenant dans les phytopathologies

II.1. Définition

Les Bactéries sont des microorganismes unicellulaires, sans noyau typique, dont les dimensions sont de l'ordre du micron. Bien qu'il existe des bactéries sphériques, en spirale, seule la forme en bâtonnet intéresse la phytopathologie (**corbaz, 2003**).

Les bactéries phytopathogènes sont pourvues d'une membrane cytoplasmique, leur matériel chromosomique se présente sous forme d'une plage irrégulière dans le cytoplasme et elles possèdent des fragments d'ADN circulaires. Elles sont en outre dotées de structures extérieures à la paroi (capsules, polysaccharides, etc.) qui jouent un rôle de fixation, de protection ou qui sont impliqués dans leur mouvement. La mobilité de ces cellules est assurée par des flagelles qui répondent à un stimulus chimique extérieur (chimiotactisme) (**Schiffers et Moreira, 2011**).

II.2. Les principaux taxons et maladies provoquées par les bactéries phytopathogènes

- Les bactéries à **Gram-**, les **Protéobactéries** constituent un groupe très diversifié. Il contient 4 sections (α , β , γ , et ϵ), comprenant des agents phytopathogènes :
 - A. Les **α -Proteobacteria** comprennent les genres *Agrobacterium* et *Rhizobium* (groupe des bactéries vasculaires responsables du flétrissement dus à l'occlusion des vaisseaux par les bactéries elles-mêmes). Mis en contact avec une blessure d'une plante hôte sensible, *Agrobacterium tumefaciens* introduit dans les cellules de la plante un fragment d'ADN qui code pour la prolifération des cellules végétales (tumeurs sur arbres fruitiers et en pépinière) (**lepoiver, 2003**)
 - B. Les **β -Proteobacteria** contient les genres *Burkholderia* et *Ralstonia*, les bactéries appartenant au genre *Burkholderia* induisent des symptômes de pourritures, de flétrissements ou de nécroses. Parmi ces bactéries, *Ralstonium solanaceae* est responsable de maladies vasculaires sur de nombreuses cultures en régions tropicales.
 - C. Les **γ -Protéobacteria** contient les genres *Pseudomonas*, *Erwinia*, *Pantoea* et *Xanthomonas*.
 - ✓ *Pseudomonas* : Bâtonnets droits, avec ou sans flagelle dotés souvent d'un pigment jaune fluorescent (**corbaz, 2003**), elles sont responsables **de nécroses foliaires ou de dépérissement des rameaux** (*Pseudomonas tabaci* agent du feu sauvage du tabac).

- ✓ *Erwinia* : Bâtonnets mobiles car dotés de plusieurs flagelles (**corbaz, 2003**), sont responsable d'importantes maladies des plantes, c'est le groupe des agents causant des **pourritures molles** et le groupe « *amylovora* », feu bactérien sur poirier, pommier et rosacées (**lepoiver, 2003**).
 - ✓ *Xanthomonas* : Bâtonnets avec un flagelle (L'espèce *Xanthomonas campestris* est ubiquiste et comporte plus d'une centaine de pathovars, et provoque la maladie des nervures noires du chou (**lepoiver, 2003**).
 - ✓ Enfin, cette section contient l'espèce *Xylella fastidiosa*, non cultivable sur milieu et qui colonise le xylème (**lepoiver, 2003**).
- D. Les ε-Protéobacteria** contient plusieurs espèces de bactéries inféodées au phloème, c'est le cas des *Liberobacter* responsables du « greening » (verdissement) des *Citrus* en Afrique du Sud notamment et transmis par des psylles (**lepoiver, 2003**).
- Les bactéries à **Gram+**, qui contiennent un pourcentage de G+C<50%, contiennent la section des *Clostridia* et la section des *molliculites*.
 - A. *Clostridia* : Ce sont des bactéries pectinolytiques appartenant au genre *Clostridium* sont des bâtonnets, anaérobies strictes, formant de spores, elles sont parfois associées à des symptômes de pourriture molle en condition d'anaérobiose (**lepoiver, 2003**).
 - B. *Molliculite* : Contenant les **phytoplasmes et les spiroplasmes**. Les maladies à **phytoplasmes** sont particulièrement importantes dans les pays tropicaux en raison de l'activité ininterrompue des insectes vecteurs. Les phytoplasmes occasionnent des symptômes affectant l'appareil reproducteur ainsi que l'appareil végétatif (pourritures molles). Les principaux symptômes induits par le **spiroplasmes** sont le nanisme, des chloroses, des jaunisses, une réduction de la taille des fruits et des feuilles ainsi que des flétrissements. Deux types de spiroplasmes sont connus ; le premier type possède dans la nature un nombre limité de plantes hôtes et le second possède un très large spectre de plantes hôtes (**lepoiver, 2003**).
 - Pour les bactéries avec un contenu en C+G>50%, il existe les **Corynébactéries** et *Streptomyces*.
 - A. **Corynébactéries** : Ce sont des bâtonnets droits ou recourbés, immobiles et sans flagelle, les espèces les plus dommageables sont *Clavibacte rmichiganense subsp. Sepedonicum* provoquant la maladie annulaire de la pomme de terre tandis que *Clavibacter michiganenese sbsp.michiganense* cause le flétrissement (chancre bactérien) de la tomate (**lepoiver, 2003**).

B. *Streptomyces* : Ce genre est particulier car il forme un pseudomycelium, autrefois classé parmi les champignons, il possède des spores en chaîne, sans flagelle, l'espèce *Streptomyces scabies*, est l'agent de la gale commune de la pomme de terre (Corbaz, 2003).

II.3. Les dix principales bactéries phytopathogènes

Selon une enquête internationale menée en 2012 auprès de bactériologistes par la revue *Molecular Plant Pathology*, les dix espèces ou genres de bactéries phytopathogènes les plus importants, en tenant compte tant des aspects scientifiques qu'économiques (Tableau 2).

Tableau 2 : Top 10 des agents phytopathogènes bactériens. Le tableau représente la liste classée des bactéries votée par les bactériologistes végétaux associés à la revue *Molecular Plant Pathology* (Mansfield et al., 2012).

	Bactérie pathogène	Auteur de la description bactérienne
1	<i>Pseudomonas syringae</i> pathovars	John Mansfield
2	<i>Ralstonia solanacearum</i>	Stéphane Genin
3	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>	Shimpei Magori, Vitaly Citovsky
4	<i>Xanthomonas oryzae</i> pv. <i>oryzae</i>	Malinee Sriariyanum, Pamela Ronald
5	<i>Xanthomonas campestris</i> pathovars	Max Dow
6	<i>Xanthomonas axonopodis</i> pv. <i>manihotis</i>	Valérie Verdier
7	<i>Erwinia amylovora</i>	Steven V. Beer
8	<i>Xylella fastidiosa</i>	Marcos A. Machado
9	<i>Dickeya</i> (<i>dadantii</i> et <i>solani</i>)	Ian Toth
10	<i>Pectobacterium carotovorum</i> (et <i>P. atrosepticum</i>)	George Salmond

1. Les nombreux pathovars de *Pseudomonas syringae*, provoquent des maladies de grande importance économique et ont joué un grand rôle dans l'appréhension scientifique de la pathogénicité bactérienne.
2. *Ralstonia solanacearum*, agent de bactérioses vasculaires dans diverses cultures de grande importance économique (bananier, tabac, pomme de terre, etc.).
3. *Agrobacterium tumefaciens*, doit sa place dans ce classement principalement à son importance scientifique.
4. *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*, agent d'une des plus graves maladies du riz.

5. Les pathovars de *Xanthomonas campestris*, sont responsables de nombreuses maladies des plantes cultivées dans le monde.
6. *Xanthomonas axonopodis pv. manihotis*, agent de la bactériose vasculaire du manioc.
7. *Erwinia amylovora*, agent du feu bactérien des arbres fruitiers.
8. *Xylella fastidiosa*, responsable de nombreuses maladies de cultures de grande importance économique, notamment la maladie de Pierce de la vigne ; c'est aussi la première bactérie phytopathogène dont le génome a été séquencé.
9. *Dickeya* (*D. dadantii* et *D. solani*), agents de maladies de la pomme de terre.
10. *Pectobacterium carotovorum* (et *P. atrosepticum*), agents de la maladie de la pourriture molle chez diverses cultures, notamment la betterave et la pomme de terre (**Mansfield et al., 2012**).

II.4. Les interactions entre les plantes et les microorganismes

Dans l'environnement naturel, les plantes sont en contact avec une grande diversité de populations microbiennes (**Hanemian, 2012**) avec lesquelles elles établissent différents types d'interactions. Certains microorganismes établissent une relation symbiotique avec la plante profitant aux deux partenaires. D'autres vivent en épiphytes sur les plantes qui leurs fournissent une niche et n'ont apparemment aucun effet. Enfin, certains microorganismes parasites nuisent aux plantes et affectent leur croissance et leur reproduction de manière plus ou moins importante (Figure 2).

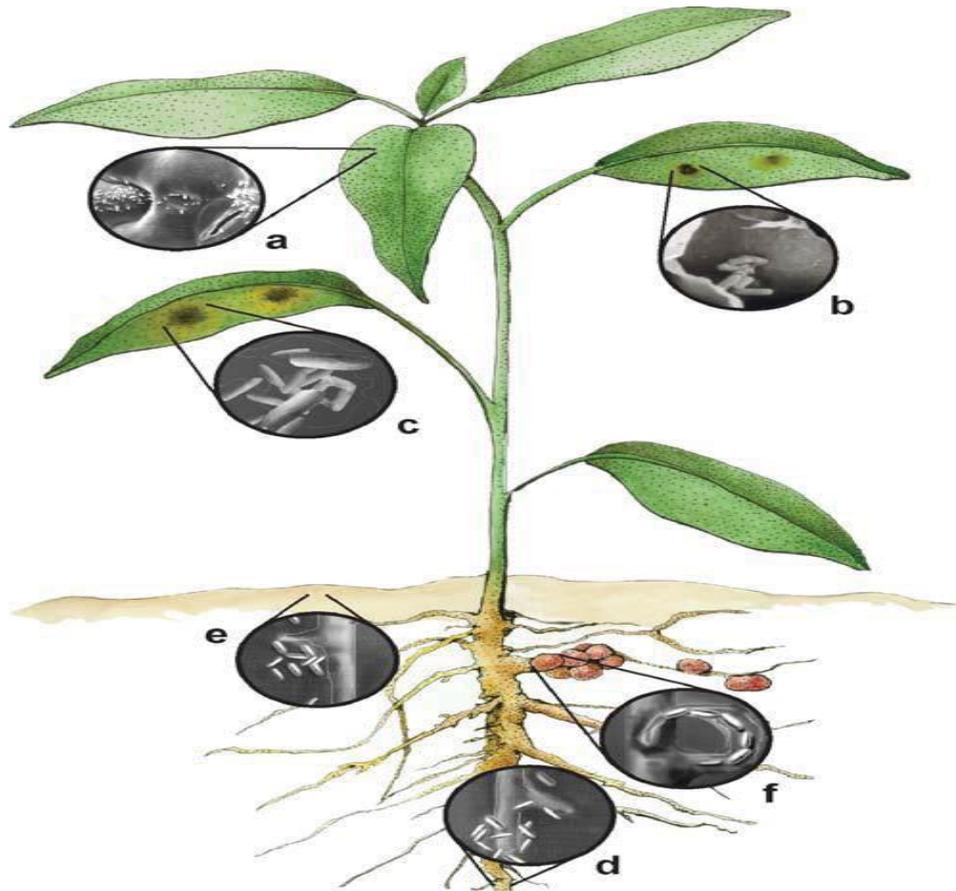


Figure 2. Schématisation de l'interaction entre une plante et des bactéries pathogènes et symbiotiques (Hanemian, 2012).

(a) *Pseudomonas syringae* se développant en épiphytes proches d'un stomate à la surface de la feuille. (b) *Pseudomonas syringae* localisée dans l'apoplaste d'une feuille infectée visualisée par microscopie électronique à balayage. (c) *Erwinia carotovora atroseptica* dans une feuille infectée. (d) *Ralstonia solanacearum* associée aux racines. (e) *Pseudomonas fluorescens* sur une racine. (f) *Rhizobium* spp. Dans un poil absorbant formant une structure en crosse de berger. Des nodules sont schématisés sur la racine indiquée.

II.5. Mode d'action des bactéries phytopathogènes–typologie des symptômes

Un point commun aux bactéries phytopathogènes est d'avoir sélectionné au cours de l'évolution des outils adaptés à leur stratégie d'infection puis d'invasion des tissus végétaux vivants, afin d'y trouver leurs moyens de subsistance dans un milieu protégé, au moins au début de l'infection, de l'inexorable compétition microbienne. Beaucoup d'entre elles ont la faculté de pouvoir vivre ou survivre dans le milieu naturel comme le sol ou l'eau (*Agrobacterium tumefaciens*, *Ralstonia solanacearum*) ou en association avec leur hôte, sans

processus infectieux déclaré : c'est la phase épiphyte, fréquente chez les *Pseudomonas* et certains *Xanthomonas* ou la phase endophyte, plus rare (*Agrobacterium*, *Clavibacter xyli cynodontis*) (Paulin et al., 2001).

Après avoir pénétré dans la plante, c'est à partir de l'apoplaste que la plupart des bactéries établissent leurs interactions avec les cellules de la plante-hôte. Ces interactions vont résulter, dans la mesure où il y a compatibilité entre l'agent pathogène et l'hôte, en l'établissement de la maladie. Pour la bactérie cela se traduira par sa multiplication et sa dispersion, pour la plante par l'apparition des symptômes et son dépérissement partiel ou total (Paulin et al., 2001).

Pour beaucoup d'espèces bactériennes phytopathogènes (*Erwinia*, *Pseudomonas*, *Ralstonia*, *Xanthomonas*...) la compatibilité pathogène-plante s'établit à la suite de la sécrétion de protéines, par l'intermédiaire d'un système de sécrétion particulier aux bactéries qui sont pathogènes (de l'animal et de la plante). Elle est suivie par la mort cellulaire végétale et la multiplication des bactéries dans l'apoplaste.

Les symptômes qui apparaissent ensuite dépendent des métabolites bactériens mis en jeu.

Il s'agit principalement de :

- Nécroses (dessèchement localisé des tissus),
- Flétrissement, parfois associés à des toxines bactériennes,
- Pourritures dues aux sécrétions d'enzymes pectinolytiques détruisant les ciments pectiques qui donnent leur cohésion aux tissus végétaux,
- Tumeurs ou des modifications hyperplasiques, dues à des déséquilibres des phytohormones, induits directement ou non par les bactéries (Figure 3).

C'est à partir de ces bases que sont définis les trois grands types de comportements pathogènes des bactéries : nécrogène (*Erwinia amylovora*) ; macergène (*Pectobacterium carotovorum*) et oncogène (*Agrobacterium tumefaciens*) (Paulin et al., 2001).

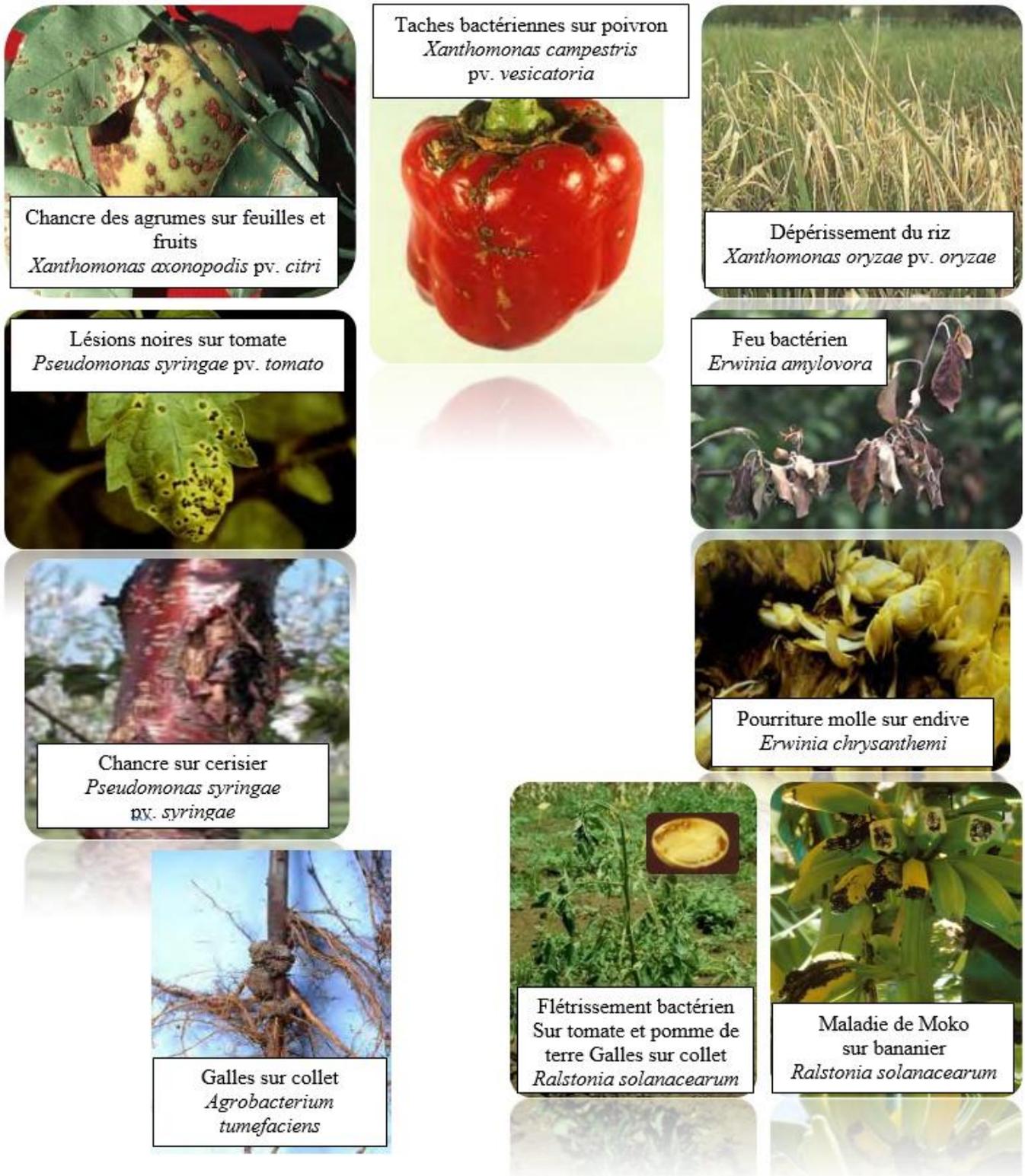


Figure 3 : Les symptômes causés par différentes bactéries phytopathogènes (Poueymiro, 2009).

II.6. Impact socio-économique des bactérioses des plantes

Les bactérioses des plantes interviennent évidemment sur la quantité et la qualité de certaines productions agricoles. Par ailleurs, leur existence n'est pas indifférente pour l'environnement, même si elle est sans effet connu sur la santé de l'homme et de l'animal. En revanche l'étude des maladies bactériennes a apporté, et apporte toujours, une contribution importante à l'étude du monde vivant (**Paulin et al., 2001**).

II.6.1. Perturbations de la production agricole

Certaines bactérioses des plantes ont un caractère de gravité dont l'impact socioéconomique peut être illustré par quelques exemples. Le dépérissement bactérien du pêcher (*Prunus persica* pv. *persicae*), une maladie nouvelle signalée pour la première fois en France en 1970, a entraîné la disparition totale des vergers de pêcheurs (1500 ha) dans la partie nord du département de l'Ardèche (plateau de Tournon) et par voie de conséquence une nécessaire reconversion de nombreuses exploitations agricoles concernées (**Paulin et al., 2001**).

Les attaques du feu bactérien (*Erwinia amylovora*) ont rendu les productions de poires relativement confidentielles en Amérique du Nord (pertes estimées à 1,7 millions de dollars) Cette même maladie, introduite dans le Sud-Ouest de la France en 1978, a conduit à l'élimination dans le cadre de mesures d'éradication de la plupart des vergers de la fameuse variété de poire Passe-Crassane avec des conséquences sociologiques sérieuses (**Paulin et al., 2001**).

Enfin, la recrudescence du Crown-Gall (*Agrobacterium tumefaciens*) dans les pépinières fruitières françaises a provoqué des restrictions à la commercialisation et des pertes financières pour une grande entreprise, de 1987 à 1989 (**Paulin et al., 2001**).

II.6.2. Impact sur l'environnement

Les bactérioses peuvent avoir un impact environnemental, en participant à un appauvrissement de la diversité génétique exploitable par impossibilité d'utilisation de génotypes trop sensibles. On peut citer l'exemple de la variété de prunier Calita interdite par sa sensibilité à *Xanthomonas arboricola* pv. *pruni* en Italie, ou celui de la variété de noisetier Fertile-de-Coutard (*Xanthomonas arboricola* pv. *corylina*) en France. La plantation de certaines espèces a même été proscrite réglementairement, du seul fait de leur sensibilité à une

maladie bactérienne et du risque de propagation associé à leur culture ; c'est le cas en France de toutes les espèces du genre *Crataegus* à cause de la présence du feu bactérien (*Erwinia amylovora*) (Paulin et al., 2001).

Un effet environnemental indirect concerne l'utilisation pour la lutte chimique des sels de cuivre (cultures maraîchères/arboriculture fruitière, viticulture) dont l'accumulation dans le sol et les effets négatifs sur la végétation vont entraîner une limitation réglementaire au niveau européen (Paulin et al., 2001).

II.6.3. Santé de l'homme et de l'animal

On peut s'interroger sur les conséquences éventuelles sur la santé des consommateurs de la présence de bactéries phytopathogènes dans l'alimentation. Ces germes appartiennent à des groupes dans lesquels on rencontre des espèces pathogènes de l'homme et des animaux (entérobactéries, *Pseudomonas*...). Certaines espèces phytopathogènes sont associées aussi à des infections de l'homme ou de l'animal (*Burkholderia cepacia*, *Pantoea agglomerans*...). Aucune information ne permet cependant d'envisager un risque direct (Paulin et al., 2001).

Les bactéries phytopathogènes se rencontrent parmi la microflore épiphyte de nombreux fruits et légumes consommés l'état frais. Ainsi, on estime qu'un gramme de feuille de laitue peut supporter 10 000 à 100 000 cellules viables de bactéries diverses. De plus, certaines d'entre elles sont naturellement porteuses de gènes de résistance à des antibiotiques. Ce constat explique pourquoi l'usage des antibiotiques pour lutter contre les bactéries phytopathogènes n'a pas été autorisé en France (à l'exception de la fluméquine sur prescription des services officiels, pour le feu bactérien) puisque :

- D'une part, il risque d'apparaître rapidement une souche résistante de l'agent pathogène.
- D'autre part, l'addition artificielle d'antibiotique dans le milieu (qui en contient pourtant déjà beaucoup, notamment du fait de l'activité microbienne dans le sol) ne peut que conduire à la sélection de gènes de résistance transférables, y compris aux agents pathogènes de l'homme et des animaux présents occasionnellement dans le milieu (microflores des eaux et du sol) (Paulin et al., 2001).

II.7. Le diagnostic des bactérioses

Bien qu'on mette en œuvre un arsenal de lutte considérable, les maladies des plantes dues aux champignons, bactéries et virus constituent toujours une cause de perte importante. Dans les pays industrialisés, celles-ci s'élèvent à près de 40% et concernent toutes les étapes de la chaîne alimentaire depuis la production jusqu'à la transformation industrielle et la commercialisation. Leur niveau est bien plus élevé encore (plus de 50%) dans les pays ACP (les pays d'Afrique, des Caraïbes et de Pacifique) qui payent la plus lourde tribu à ce gaspillage de ressources alimentaires. D'où la nécessité de connaître l'épidémiologie, la biologie des différents agents pathogènes afin de pouvoir poser un diagnostic le plus précis sur base des symptômes observés en champ ou en laboratoire (Figure 4). (Schiffers et Moreira, 2011).

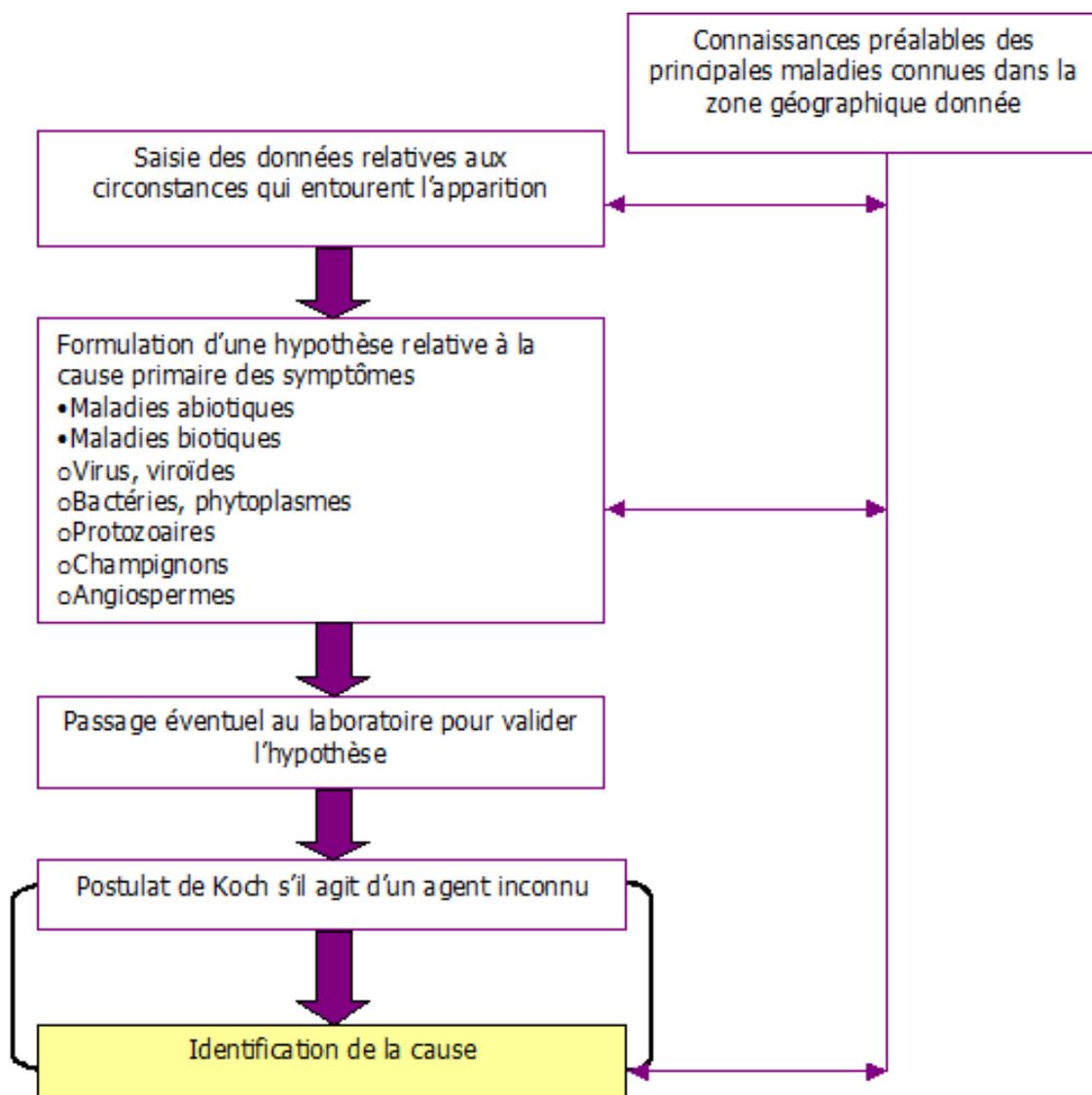


Figure 4 : Les principales étapes du diagnostic d'un agent phytopathogène (Lepoivre, 2003).

Au laboratoire, les échantillons peuvent être soumis à différents examens selon l'objectif à atteindre et les moyens de diagnostic disponibles. Selon les cas, plusieurs techniques peuvent être employées :

- Techniques bactériologiques classiques basées sur l'étude de la morphologie et du métabolisme bactérien.
- Profil de résistance aux antibiotiques.
- Profil d'acides gras.
- Techniques immunologiques (**Michel, 1988**).

II.7.1. Techniques bactériologiques

L'identification de l'agent pathogène se déroule toujours selon le même processus. Cette technique sera toujours employée ; elle est à la base de tout diagnostic bactérien. La première phase consiste à isoler l'agent pathogène à partir du matériel suspect ou de l'échantillon de sol à analyser. Très souvent, on utilise des milieux sélectifs basés à la fois sur :

- L'inhibition de la croissance de la flore accompagnatrice par des substances antiseptiques (berberine, sélénite de sodium...), des antibiotiques (actidione, bacitracine...).
- Et sur la stimulation de la croissance de l'agent pathogène en utilisant des substances nutritives appropriées.

Les colonies ainsi obtenues sont repiquées sur un milieu riche à base très souvent de peptone, glucose et extrait de levure afin de vérifier la pureté de la bactérie isolée ou de l'isolat à analyser. Le travail d'identification de l'agent pathogène peut alors commencer. Les tests sont basés sur:

- L'étude morphologique de la bactérie : forme, structure de la paroi (coloration de Gram), mobilité (présence ou absence de flagelles), présence ou non de capsules, de spores...
- L'étude du métabolisme bactérien : type respiratoire (aérobie stricte, anaérobie facultative, anaérobie stricte), voie d'utilisation du glucose (oxydative, fermentative...), présence des systèmes enzymatiques particuliers (oxydase, catalase, β -galactosidase, nitrate réductase, amylase, gélatinase...), sources carbonées et azotées utilisées.

Selon l'espèce à laquelle appartient l'agent pathogène recherché, on privilégiera tels ou tels tests et très souvent pour un travail de routine 4 à 5 tests suffisent pour l'identification de l'agent pathogène (**Michel, 1988**).

II.7.2. Résistance aux antibiotiques

La recherche du profil de résistance des bactéries aux antibiotiques découle directement des études menées en milieu hospitalier. À partir de telles études épidémiologiques, des systèmes de diagnostic ont été mis au point, systèmes basés sur l'analyse de bases de données ; ces systèmes ont pour référence la résistance de tel groupe bactérien à telle ou telle famille d'antibiotiques. Cependant, ces techniques commencent à être utilisées en phytobactériologie à des fins d'enquêtes épidémiologiques (**Beynon et al., 1980**).

II.7.3. Identification des bactéries par profils d'acides gras

Cette technique est récente et vient d'être commercialisée par Hewlet-Packard. Les bactéries contiennent dans leur paroi des acides gras dont la nature et la quantité sont stables pour un organisme donné. Les acides gras peuvent être extraits des cellules bactériennes et analysés en chromatographie gazeuse. Le chromatogramme ainsi obtenu est comparé avec des profils de référence contenus dans une base de données (**Michel, 1988**).

II.7.4. Techniques immunologiques

Au cours des dix dernières années, ces techniques immunologiques ont connu un rapide essor à cause de la rapidité et de l'amélioration des techniques d'identification. Les échanges internationaux de plants (graines, boutures ...), plus intensifs, ont augmenté la demande de création de techniques de routine très rapides pour tester l'état sanitaire du matériels végétaux pouvant introduire des maladies nouvelles dans le pays d'importation. Les techniques de dépistage utilisent des anticorps marqués à l'aide d'un fluorochrome (méthodes d'immunofluorescence) ou d'une enzyme (méthodes immunoenzymatiques ou ELISA = Enzyme Linked-Immuno-Sorbent Assay) (**Michel, 1988**).

II.7.4.1. Méthodes d'immunofluorescence

La technique mise au point par **Coons et al., (1941)** allie les méthodes cytologiques et immunologiques : l'immunofluorescence consiste à conjuguer une globuline à une substance fluorescente : l'isothiocyanate de fluorescéine et à la mettre en présence de l'antigène (**Riggs et al., 1958**). L'immunoglobuline reconnaît l'antigène et s'y lie. Le complexe antigène-anticorps est alors détecté de façon précise.

En 1964, Paton adapte l'immunofluorescence à la détection des bactéries dans les tissus végétaux. Depuis, l'utilisation des techniques d'immunofluorescence a connu un rapide essor pour tester l'état sanitaire des semences, pour détecter des agents pathogènes dans la sève, le sol et les tissus végétaux et pour effectuer des études épidémiologiques sur un grand nombre de bactéries phytopathogènes.

En matière forestière, les premières études épidémiologiques utilisant l'immunofluorescence ont débuté en 1983 par les recherches sur la structure d'une population d'*Agrobacterium tumefaciens* présente sur galles de peupliers grisards. Depuis ces études se sont étendues à d'autres pépinières afin de suivre les risques de propagation de la « galle du collet » d'une pépinière à l'autre. Des essais méthodologiques ont été entrepris afin de quantifier la population d'*Agrobacterium* présente dans un sol par immunofluorescence (Michel, 1988).

II.7.4.2. Méthodes immunoenzymatiques

Les techniques immunoenzymatiques furent développées par Van Weemen et Schuurs (1971) et Engvall et Perlman (1971, 1972). Voiler et al. (1976) et Clark et Adams (1977) les utilisent pour détecter les bactéries phytopathogènes. Depuis, ces techniques sont largement utilisées lors de tests de dépistage de routine à cause de leur grande sensibilité (Michel, 1988).

Chapitre III.

Les moyens de lutte contre les maladies des plantes

III. Les moyens de lutte contre les maladies des plantes

Pour aboutir à des cultures et des récoltes saines, quelle que soit la région, on doit faire appel à des méthodes de lutttes efficaces (**Champion et al., 2009**).

III.1. La lutte biologique

III.1.1. Définition

La lutte biologique consiste à combattre une maladie causée par un organisme au moyen d'un autre organisme. Une autre définition plus large de la lutte biologique est parfois utilisée : "Toute action mettant en jeu des organismes modifiant l'hôte, y compris les méthodes culturales, qui permettent de diminuer, par voie directe ou indirecte, les dommages causés par un parasite" (**Corbaz, 2003**). La lutte biologique est considérée comme une voie alternative à l'utilisation des produits chimiques qui constituent un danger pour l'environnement et pour l'homme. L'utilisation de plusieurs modes d'action par un seul agent antagoniste et sa capacité d'adaptation à la rhizosphère contribuent à ce que la lutte biologique devienne plus durable que les produits chimiques (**Benbrook et al., 1996**).

Dans le sens écologique strict, l'application de la lutte biologique peut être considérée comme une stratégie pour restaurer la biodiversité dans les agro-écosystèmes par l'addition des antagonistes naturels (parasite ou prédateur) (**Si Amer., 2017**).

III.1.2. Principes de la lutte biologique

Les techniques de lutte biologique font appel à deux principes :

- La réduction de l'inoculum infectieux pendant la phase de conservation ou de survie du pathogène ; et/ou l'interférence avec le processus d'infection de la plante hôte.
- Le contrôle biologique des agents pathogènes qui s'exerce en détruisant l'inoculum infectieux, en l'inactivant ou réduisant sa virulence (**Toua, 1996**).

III.1.3. Rôle de PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobactéria)

Les effets bénéfiques des rhizobactéries sur la croissance végétale résultent de différents mécanismes exercés par les RPCP dont les modes d'action sont directs ou indirects, bien que la différence entre les deux ne soit pas toujours évidente. Les mécanismes indirects sont, en général, ceux qui se produisent en dehors de la plante, tandis que les mécanismes directs sont ceux qui se produisent à l'intérieur de la plante et affectent directement leur métabolisme. Ces

mécanismes pouvant être actifs simultanément ou séquentiellement à différentes étapes de la croissance des plantes, ces mécanismes sont :

- 1- La solubilisation des phosphates, la fixation de l'azote et les minéraux nutritifs, rendant ces aliments disponibles pour la plante.
- 2- La production de phytohormones telles que l'acide d'indole-3-acetic (IAA).
- 3- La répression des microorganismes pathogènes du sol (par la production du cyanure d'hydrogène, de sidérophores, d'antibiotiques, et/ou de la concurrence pour les nutriments (Gupta et al., 2000).

III.1.4. Mécanismes d'action d'un agent de lutte biologique

La protection conférée par un microorganisme de lutte biologique s'appuie sur un ou plusieurs mécanismes d'action tels que la compétition (pour les éléments nutritifs, l'oxygène ou l'espace), l'antibiose, le parasitisme, la diminution de l'agressivité du pathogène et l'induction de la résistance chez la plante. L'étude de ces mécanismes d'action est une étape importante dans le développement de la lutte biologique (Jijakli, 2003).

III.1.4.1. Compétition

La compétition pour les éléments nutritifs entre en jeu lorsqu'il y a simultanément consommation du même composé par plusieurs microorganismes. Pour être un compétiteur efficace, un agent antagoniste doit être capable d'utiliser rapidement et efficacement les éléments nutritifs présents en faible concentration sur les organes de la plante (Jijakli, 2003).

En occupant la même niche écologique qu'un agent pathogène, un microorganisme peut entrer en compétition avec l'agent pathogène au niveau des nutriments, ce qui peut diminuer ou même empêcher la croissance de cet agent pathogène. Par exemple, certaines bactéries produisant des sidérophores ont un avantage écologique. Les sidérophores de ces microorganismes captent le fer, pouvant le rendre ainsi non disponible pour l'agent pathogène ce qui, pas conséquent, limite sa croissance. Ce mécanisme est souvent attribué aux agents antagonistes de l'espèce *Pseudomonas fluorescens* (Corbaz, 2003). Les sidérophores produits par *Pseudomonas fluorescens* formeraient un complexe avec les métaux du sol et les rendraient non disponibles pour les autres microorganismes de son environnement dont le *Pythium ultimum*, causant la fonte des semis (Howell et Stipanovic, 1980).

Outre la compétition nutritionnelle, la compétition spatiale contribue aussi à la réduction des infections racinaires par les agents phytopathogènes (Benítezet al., 2004). En effet, les microorganismes ayant la capacité de coloniser les racines comme les bactéries promotrices

de la croissance des plantes (Plant Growth Promoting Bacteria, PGPB) protègent les racines et occupent les sites d'infection des agents phytopathogènes (**Benítezet al.,2004;Compantet al., 2005**).

III.1.4.2. Parasitisme

Ce mécanisme de lutte consiste en une interaction directe entre deux microorganismes où les tissus vivants de l'un constituent une base nutritive pour l'autre (**Helluy et Holmes, 2005**). Il implique l'invasion des cellules de l'agent pathogène par le microorganisme antagoniste (**Corbaz, 2003**). L'agent antagoniste utilisera des enzymes lytiques telles que des glucanases, des chitinases et des lysozymes pour dégrader les parois de l'agent pathogène.

III.1.4.3. Anabiose

La sécrétion de substances antibiotiques par les microorganismes est un phénomène fréquent. Certains métabolites sont capables d'interférer avec la germination, la croissance mycélienne et/ou la sporulation des agents phytopathogènes. D'autres entraînent le relargage de composés cellulaires suite à la perturbation de la perméabilité cellulaire. L'antibiose est le mode d'action le plus étudié chez les agents de lutte biologique (**Jijakli, 2003**). Elle consiste en la production par l'agent antagoniste d'antibiotiques efficaces contre l'agent pathogène (**Corbaz, 2003**). Ces antibiotiques vont ralentir ou arrêter la croissance de l'agent pathogène. La fonte des semis du coton due à *Pythium ultirnum* peut être combattue par un enrobage des semences avec la souche de *Pseudomonas fluorescens*. Cette souche produit un antibiotique, la polyulutérine. La fonte des semis est ainsi réduite de façon significative aussi bien par l'utilisation de ce *Pseudomonas* comme agent d'enrobage que par l'utilisation de l'antibiotique purifié (**Howell et Stipanovic, 1980**).

III.1.4.4. Induction des systèmes de résistance de la plante hôte

Des microorganismes de lutte biologique sont capables de déclencher une résistance systémique induite (ISR) chez la plante hôte, ce qui peut rendre l'hôte plus résistant à l'agression future par des agents pathogènes (**Jijakli, 2003**). L'induction des systèmes de résistance chez la plante a été démontrée pour la première fois par **Kempe et Sequira (1983)**. Ces derniers ont remarqué que des pré-traitements par des bactéries ont protégé des tubercules de pomme de terre des infections de *Pseudomonas solanacearum*.

III.1.5. Agents de lutte biologique

Le contrôle biologique avec les microorganismes bénéfiques permet d'augmenter le rendement en supprimant directement l'inoculum pathogène et/ou en induisant la résistance des plantes. Plusieurs travaux ont été entrepris pour la sélection des antagonistes aux microorganismes phytopathogènes afin de les utiliser comme agents potentiels de lutte biologique (Si Amar, 2017) (Tableau 3).

Tableau 3 : Les agents de lutte biologique commercialisés pour la lutte contre les agents pathogènes du sol, de la phyllosphère et de post-récolte (Jijakli, 2003).

Antagonistes (agents de lutte biologique)	Espèces ciblées	Noms commerciaux	Compagnies	Pays
<i>Agrobacterium radiobacter</i> Souche 84	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>	Galltrol-A Norbac 84-C Nogall Diegall	AgBioChem IPM Labs Blo-Care Tcchnologv Bio-Care	USA
<i>Bacillus subtilis</i>	<i>Streptomyces scabies</i>	HiStick N/T Epic Companion Kodiak Rhizo-Plus, System, Bio-T	MicroBio Group MicroBio Group Grovrth Products Gustafson KFZB Biotechnik Helena Chemical Alron Chemical	USA, Suède
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	<i>Pseudomonas tolaassii</i>	Conquer	MauriFoods	USA, Australie
<i>Ralstonia solanacearum</i>	<i>Ralstonia solanacearum</i>	PSSOL	Nalural Plant Protection	France
<i>Bacillus subtilis</i>	Feu bactérien, pourriture brune, mildiou pomme de terre, mildiou	Serenade	AgrOuest	USA
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	<i>Erwinia amylovora</i>	BlightBan A506	Plant Health Technogies	USA

III.1.6. Les avantages et les inconvénients de la lutte biologique

III.1.6.1. Les avantages

La lutte biologique présente de nombreux avantages des points de vue environnementaux, sociaux et économiques (Lefort, 2010), elle est :

- Efficace.
- Permet de restreindre ou d'éliminer l'utilisation des pesticides chimiques.
- Moins toxique que les pesticides chimiques.
- Utilisable en serre.
- Permet de diminuer les risques d'apparition de résistances aux produits chimiques.
- Plus grande spécificité d'action.
- Faible coût de développement.
- Amélioration de la qualité de vie et de la santé des travailleurs agricole.
- Pas de délai de traitement avant la récolte.
- Non contamination des produits (pas de résidus chimiques).
- Dégradation rapide des biopesticides, diminuant les risques de pollution(Lefort, 2010).

I.5.2. Les inconvénients (des limites)

- Lutte souvent faite en prévention et moins efficaces lorsque curative.
- Effet moins drastique que les pesticides (plus d'application).
- Effet différé.
- Efficacité pas toujours constante d'une production à l'autre.
- Efficacité relative aux conditions climatiques.
- Activité restreinte lors d'une grande pression du ravageur.
- Conditions d'entreposage des produits biologiques (demi- vie et températures plus fraîche).
- Nécessite d'excellentes connaissances de l'écologie des pathogènes cibles et des agents de contrôles biologiques et de relation pathogène cible- agent de contrôle biologique (Lefort, 2010).

III.2. La lutte chimique

Les traitements chimiques sont largement utilisés pour combattre les maladies bactériennes. Les quelque 120 matières actives antiparasitaires disponibles sont dans leur grande majorité des molécules organiques de synthèse, avec toutefois quelques substances minérales dont le soufre élémentaire et des produits cupriques, ainsi que des antibiotiques

autorisés dans certains pays (mais interdits dans d'autres) contre des bactéries phytopathogènes (**lepoiver, 2003**).

La plupart des molécules antibactériennes utilisables en agriculture agissent directement sur les agents pathogènes. Sur la base de leur mode d'action, il est possible de classer les matières actives en deux catégories principales selon qu'elles possèdent plusieurs sites d'action (multisites) ou qu'elles perturbent spécifiquement une seule voie métabolique (unisites). A côté des substances antiparasitaires à effets directs, il est possible de protéger les plantes de manière indirecte à l'aide de composés qui, soit inactivent des médiateurs émis par les parasites et indispensables à leur pathogénicité (Enzymes, toxines), soit stimulent les réactions de défense des plantes (inducteurs) (**Leroux et Gardan , 2003**).

III.2.1. Composés agissant directement sur les parasites

III.2.1.1. Matières actives multisites

Les activités antibactériennes ont également été décelées pour plusieurs composés multisites (ex: composés cupriques, dithiocarbamates, doguadine) mais seuls les produits cupriques sont effectivement utilisés contre des phytobactérioses. Ainsi dès les années 1920, la bouillie bordelaise a été largement utilisée pour traiter le feu bactérien causé par *Erwinia amylovora*, pendant la période de floraison des pommiers et des poiriers. Quand ils sont appliqués par temps froid et humide, les produits cupriques peuvent provoquer de la phytotoxicité. L'efficacité antibactérienne du cuivre serait due à la fois à son action directe sur les bactéries, mais aussi à un effet indirect rendant les feuilles plus résistantes à l'invasion par les bactéries (**lepoiver, 2003**).

III.2.1.2. Produits affectant le métabolisme des acides nucléiques, des protéines ou de leurs précurseurs

- **Les Fluoroquinolones**

Les Fluoroquinolones sont un groupe d'antibactériens de synthèse largement utilisés en médecine humaine et vétérinaire ainsi que comme additif dans l'alimentation du bétail. Seule la fluméquine qui en fait est une Fluoroquinoléine est utilisable contre des phytobactéries (*Erwinia amylovora*, *Pseudomonas syringae* pv.*persicae*, et pv.*syringae*). Ces Fluoroquinolones inhibent la réplication de l'ADN et provoquent des cassures des brins d'ADN entraînant la mort de la cellule. L'inhibition de la réplication de l'ADN résulte d'une

fixation de ces Fluoroquinolones sur l'ADN gyrase (enzyme modifiant le degré de torsion de la molécule d'ADN) (Iepoiver, 2003). Seule la résistance d'origine chromosomique est connue pour ces Fluoroquinolones, mais elle ne concerne pas à ce jour de phytobactéries.

- **Les inhibiteurs de la synthèse protéique**

Les inhibiteurs de la synthèse protéique à usage agricole sont tous des antibiotiques, la plupart étant des antibactériens. Parmi eux, la streptomycine, un aminoglycoside produit par *Streptomyces griseus*. Son créneau principal a été et demeure le feu bactérien des pomoidés provoqué par *Erwinia amylovora*. La streptomycine se fixe sur une protéine de la sous-unité 30S et empêche l'élongation ; d'autres effets ont été décrits, notamment sur la terminaison (Iepoiver, 2003).

L'oxytétracycline produite par *Streptomyces rimosus* appartient à la famille des tétracyclines qui sont des antibactériens à large spectre. Ces antibiotiques inhibent l'élongation en empêchant l'appariement de l'anticodon de l'ARN de transfert sur le codon correspondant de l'ARN messager. L'oxytétracycline est notamment utilisée contre le feu bactérien des pomoidés ainsi que contre la maladie des tâches bactériennes des *Prunus* dues à *Xanthomonas arboricola* pv. *pruni* (Iepoiver, 2003).

III.2.2. Composés à action indirecte sur les parasites

La protection phytosanitaire peut être assurée indirectement en inactivant des enzymes ou des toxines émises par les parasites. En utilisant à titre d'exemple, le probénazole qui est un fongicide pouvant être appliqué par voies foliaire et racinaire sur le riz pour lutter contre la pyriculariose et contre la bactérie *Xanthomonas oryzae* (Leroux et Gardan, 2003).

III.2.3. Les inconvénients de la lutte chimique

L'utilisation irraisonnée des produits chimiques a eu dans certaines situations, des conséquences inattendues sur la santé humaine et pour l'environnement telles que, la pollution importante des écosystèmes et problèmes de santé publique causés par le chlordécone, aux Antilles (Dallaire et al., 2012).

III.2.3.1. Effets sur la santé humaine

La révolution verte nous a enseigné que l'emploi intensif de pesticides et d'engrais est nocif pour les écosystèmes et par conséquent pour la santé de l'animal et de l'homme (**Rachel, 1962**). Plusieurs études expérimentales ou épidémiologiques laissent supposer un risque important d'atteinte par certaines formes de cancer à la suite de l'exposition chronique à certains pesticides couramment utilisés. Les types de cancers les plus souvent cités sont le cancer de cerveau, de poumon, de foie, de l'estomac et la leucémie (**Capkin et al., 2006**).

III.2.3.2. Effets sur l'environnement

D'un point de vue écologique, les pesticides ne sont pas des produits anodins. En effet, ils sont responsables de nombreux effets toxiques secondaires causant des risques potentiels pour l'environnement (**Relyea, 2009**). L'utilisation intensive des pesticides affecte la fertilité du sol.

III.3. La lutte physique

Différents moyens physiques et mécaniques peuvent être utilisés pour éliminer ou limiter le développement de certains ennemis. Ils ne suffisent pas à protéger totalement les cultures. C'est pourquoi ils sont généralement associés à d'autres moyens de lutte (**Eliane, 2010**). Certains facteurs physiques, tels que la température (basse et élevée), l'air sec, la lumière et la radiation, peuvent être utilisés pour contrôler les maladies des plantes (**Nasraui, 2006**).

Il faut empêcher la conservation des agents phytopathogènes dans l'environnement, les débris de plantes malades, sont susceptible de produire un inoculum capable d'attaquer les plantes cultivées saines placées dans un substrat sain. En vue de limiter ces sources, potentielles de contamination, plusieurs méthodes préventives peuvent être utilisées notamment la destruction par le feu des débris végétaux infectés ou leur enfouissement dans le sol (**Si Amar., 2017**).

La désinfection du sol, soit par la solarisation ou traitement à la vapeur, semble la seule méthode de contrôle approuvée. La solarisation consiste à bien mouiller le sol et à le recouvrir d'une toile en plastique pendant les périodes les plus chaudes de l'été (**Mohamed, 2010**), la température sous la toile devient rapidement très élevée, ce qui détruit les organismes responsables des maladies des plantes (**Melero-Vara et al., 2013**).

III.4. La lutte génétique

La lutte génétique, très utilisée ces dernières décennies, permet de créer des cultivars résistants en utilisant les ressources génétiques intra- et inter-espèces. Une résistance spécifique, très efficace contre un agent pathogène donné peut toutefois être rapidement contournée par mutation, particulièrement lors des cultures successives et prolongées. Une résistance plus générale quant à elle, n'est pas totale mais ralentit la progression de la maladie causées par un grand nombre d'agents pathogènes (**Hanemian, 2012**).

III.5. Méthode culturale

Plusieurs techniques culturales réduisent le risque des maladies avant ou pendant l'implantation de la culture (**Maufras, 2001; Hosford, 2012**) on citera à titre d'exemple :

- Eviter les semis précoces et trop denses.
- Assurer un désherbage permettant d'éliminer les mauvaises herbes qui entretiennent un microclimat humide qui pourrait être un foyer de germes pathogènes.
- Eliminer les repousses des plantes.
- Respecter les assolements et les rotations (**Maufras, 2001; Hosford, 2012**).

Conclusion

Conclusion

Les bactéries phytopathogènes existent. Bien que proches des germes pathogènes de l'homme et de l'animal, elles ne sont pas capables de provoquer des maladies sur d'autres hôtes que des plantes. Cependant, certaines de ces maladies peuvent avoir des conséquences sociales et/ou économiques redoutables ; sans exagérer les risques, il faut les considérer avec attention et développer des parades adaptées pour maintenir leur impact à un niveau acceptable (**Paulin et al., 2001**).

De nombreuses stratégies de lutte contre les agents pathogènes ont pourtant été développées, parmi lesquelles on peut notamment citer : la lutte biologique, chimique, physique, etc. Où La lutte biologique est née d'un certain échec de la lutte chimique, essentiellement du a e nombreux abus, a la présence des résidus ainsi qu'a une absence de vue globale des différents problèmes, en particulier l'impact sur l'environnement. Les traitements chimiques ont augmenté considérablement, jusqu'à devenir dans certains as insupportables sur plan économiques (**Corbaz, 2003, Hanemian, 2012**).

Si les traitements avec des pesticides (bactéricides) présentent de bons résultats à court terme, a long terme leur action secondaire sur l'environnement devient inquiétante. Le traitement chimique représente une solution de facilité, qui correspond aussi au besoin d'absolu de l'homme, désirant un résultat rapide. La lutte biologique au contraire n'a qu'une efficacité relative et demande davantage de connaissances et d'observation, mais a long terme, elle est plus intéressante sur tous les plans (**corbaz, 2003**).

En partageant des frontières avec d'autres disciplines scientifiques comme la biologie moléculaire, la génétique, la biochimie, la physiologie des plantes et des pathogènes, la phytopathologie a permis l'avancée de nombreuses recherches dans ces domaines parmi eux compréhension des mécanismes de défense des plantes (Hypersensitive Response), découverte et utilisation du mécanisme de pathogénèse d'*Agrobacterium tumefaciens* comme outil de transformation biologique. La phytopathologie aura des incidences directes et indirectes sur l'évolution de ces industries et de l'agriculture. Elle permettra de prévoir de nouveaux moyens de lutte appropriés et une meilleure protection des plantes cultivées tout en respectant l'environnement (**Hanemian, 2012**).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Agrios G.N., (2005). Plant Pathology. (5th edition), Academic Press, p952.

Benbrook C. M., Groth E., Halloran J. M., Hansen M. K. and Marquardt S. (2008). Pest management at the crossroads, Consumers Union, Yonkers. p272.

Benítez T., Rincón A.M., Limón M.C. et Codón A.C., (2004). Biocontrol mechanisms of Trichoderma strains. *Int. Microbiol.* **7**, p 249-260.

Beynon J. L., Josey D.P., (1980). Demonstration of heterogeneity in a natural population of Rhizobium phaseolium using variations in intrinsic antibiotic resistance. *Journal of general Microbiology*, **118**, 1980, p 437-442.

Capkin E., Altinok I. et Karahan S. (2006). Water quality and fish size affect toxicity of endosulfan, an organochlorine pesticide, to rainbow trout. *Chemosphere.* **64**: 1793-1800

Champion R., Ray Nal G., (2009). La carie commune du blé : une revenante. *phytona. la défense des végétaux* .N450.p.12-20.

Coons A. H., Creech H. J., Jones R. N., (1941). Immunological properties of an antibody containing a fluorescent group. *Proc . Soc. Expl .Biol .Med.*, **47**, 1941. p 200-202.

Compant S., Duffy B., Nowak J., Clément C., et Ait Barka E., (2005). Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects. *Appl. Environ. Microbiol.* **71(9)**, 4951-4959.

Corbaz R. (2003). Principe de phytopathologie et de lutte contre les maladies des plantes. Presse polytechniques et universitaires romandes.

Dallaire R. G., Mukle F., Rouget P., Kadhel H., Bataille L., Guldner S., Seurin V., Chajes C., Monfort O., Boucher J. P., Thome S., Jacobsen W., Multigner L et Cordier S., (2012). Cognitive, visual, and motor development of month-old Guadeloupean infant exposed to chlordécone. *Environmental Research.* **118**: 79:85.

Gupta A., Gopal M., Tilak K. V., (2000). Mechanism of plant growth promotion by rhizobacteria. *Indian Journal of Experimental Biology.* p 856–862.

- Hanemian M., (2012).** Rôle de la protéine CLV1 dans la sensibilité d'*Arabidopsis thaliana* à la bactérie phytopathogène *Ralstonia solanacearum*. Thèse de Doctorat en Interactions Plantes-Microorganismes. L'Université Toulouse III - Paul Sabatier. p 190
- Helluy S., et Holmes J.C., (2005).** Parasitic manipulation: further considerations. *Behav. Processes* .**68**, p185-99.
- Howell C.R., Stipanovic R.D., (1980).** Suppression of *Pythium ultimum*-induced damping off of cotton seedlings by *Pseudomonas fluorescens* and its antibiotics, pyoluterin. *Phytopathol.* **70**, p 712-715.
- Jijakly M. H., (2003).** La lutte biologique en phytopathologie, *In* : *Phytopathology*. Lepoivre P. (Eds). De Boeck, Bruxelles.
- Jousse C., (2006).** Contribution à la lutte contre les maladies du bois de la vigne, en particulier l'Esca. Thèse de doctorat, Univ. Poitiers, France, p 160.
- Kannan V., Bastas K., et Devi R., (2015).** Scientific and economic impact of plant pathogenic bacteria, in *Sustainable Approaches to Controlling Plant Pathogenic Bacteria*, eds R.V. Kannan, and K. K. Bastas (Boca Raton, FL: CRC Press), p369–392.
- Kempe J., et Sequeira L., (1983).** Biological control of bacterial wilt of potatoes: Attempts to induce resistance by treating tubers with bacteria. *Plant Dis.***67**, p499-501.
- Lefort F., (2010).** Lutte biologique et lutte microbiologique : des concepts anciens pour des méthodes de lutte modernes. Haute Ecole de Paysage d'ingénierie et d'architecture. Genève.
- Lepoivre P., (2003).** *Phytopathologie*. De Boeck les presses agronomiques de Gembloux, p 432.
- Mansfield J., Genin S., Magori S., Citovsky V., Sriariyanum M., et Ronald P.,(2012).** Top 10 plant pathogenic bacteria in molecular plant pathology. *Mol Plant Pathol.* BSPP AND BLACK WELL PUBLISHING LTD. p 614-629.
- Maufras, (2001).** The role of the cropping method in the elimination of hazardous fungicides (*Tilletia caries*). Mémoire d'ingénieur. IST.univ.Tebessa. p70.

- Martins P. M. M., Merfa M. V., Marco A., Takita M.A., et Alessandra A., (2018).** Persistence in Phytopathogenic Bacteria: Do We Know Enough?. Weihui Wu, Nankai University, China. p 14.
- Melero-Vara, Blanco-Lopez, M.A Bejarano-Alcazar.(2013).** the control of cotton by means of soil solarization and tolerant cultivars in southern Spain. *Plantpatho*, 44 p 250-260.
- Michel. M., (1988).** Le diagnostic de bactériose. Station d'Amélioration des Arbres forestiers. p110-117.
- Mohamed H., (2010).** Effets antagonistes entre les souches d'actinomycètes et *Verticillium dahliae* agent de la verticilliose de l'olivier. Doctoral dissertation, Université Ahmed Ben Bella d'Oran 1 Es Senia.
- Nasraoui B., (2006).** Les champignons parasites des plantes cultivées, biologie, systématique, pathologie, maladies. Centre de publication universitaire, Tunis. p 456.
- Paulin J. P., Ride. M., Prunier. J.P., (2001).** Découverte des bactéries phytopathogènes il y a cent ans : controverses et polémiques transatlantiques. Paris, Sciences de la vie. p 905- 914.
- Poueymiro M., (2009).** Caractérisation fonctionnelle des effecteurs de type III de *Ralstonia solanacearum* : AvrA et PopP1, délimitant le spectre d'hôte et RipTPS, synthétisant une molécule signal chez les plantes. Thèse de Doctorat en Microbiologie : Microorganismes : du génome aux interactions avec l'hôte. L'Université Toulouse III - Paul Sabatier. p271
- Rachel C., (1962).** Printemps silencieux (Boston : Houghton Mifflin, 1962). Paris, Plon.
- Relyea R. A., (2009).** A cocktail of contaminants: How mixtures of pesticides at low concentrations affect aquatic communities. *Oecologia*. (2): p 363-376.
- Riggs J. L., Seiwald R. J., Burckhaleer J. H., Downs C. M., Metcalf T. G., (1958).** Isothiocyanate compounds as fluorescent labelling agents for immune serum. *Ann. J. Pathol.* , 34, 1958, p 1081-1097.
- Schiffers B., et Moreira C., (2011).** Fondements de la protection des cultures. Manuel 7. PIPc/COLEACP. p293.
- Semal J., (1982).** Pathologie des végétaux et géopolitique. *Paris*, la maison Rustique, p270.

Si Amar H., (2017). Application des bacilles thermophiles dans la lutte biologique. Mémoire de Master en Microbiologie Appliquée. L'université de Tlemcen. p43.