

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

*Mustapha Stambouli University of  
Mascara  
Faculty of Nature and Life Sciences  
Department of agronomic sciences*



جامعة مصطفى اسطنبولي ممسحر  
كلية علوم الطبيعة و الحياة  
قسم العلوم الفلاحية

## **Polycopié pédagogique de Cours D'Epidémiologie Végétale et Prévisions des Risques**

Polycopié destiné aux étudiants de  
Master II : Spécialité Protection des végétaux

**Présentée par Dr. MERZOUG AOUMRIA**

**Année Universitaire : 2024/2025**

# PRÉFACE

Ce polycopié est le support de cours destinés à des étudiants de masters 2 LMD de la spécialité protection des végétaux, Conforme aux programmes du LMD.

Ce fascicule s'adresse particulièrement aux étudiants de la deuxième année masters protection des végétaux (PV) et peut être aussi consulté par les étudiants de l'ingénieur en agronomie, comme il peut être consulté par les étudiants de l'université dans le domaine des Sciences de la nature et de la vie dont les filières Agronomie.

Ce polycopié est un support complémentaire assez captivant pour les étudiants de masters protection, production des végétaux et protection de l'environnement.

Il est conçu de façon à aplanir au mieux les difficultés inhérentes au discours scientifique tout en conservant la rigueur nécessaire. Le cours qui présente les principales notions à comprendre et à connaître est accompagné d'illustrations, d'exemples et d'observations saisie de données réels pris directes du terrain afin d'assimiler immédiatement les notions traitées.

- **Partie introductive :** est consacré aux concepts généraux relatifs à l'épidémiologie végétale et décrits les différentes facettes des pertes occasionnés par les maladies de plantes. En plus des rappels nécessaires des objectifs de l'épidémiologie, les principales définitions ont été établis, les champs de l'épidémiologie et la dynamique des épidémies a été expliquer. Cette partie introduit des définitions claires et des notations appropriées.
- **Le premier chapitre :** est consacré aux paramètres relatifs à l'hôte ou les notions liées à l'expérimentation en épidémiologie pour quantifier le parasite en le reliant à la relation entre intensité des symptômes et des rendements
- **Le deuxième chapitre :** dans ce chapitre les paramètres relatifs aux agents pathogènes en relation avec les moyens de conservation et de dispersions de l'inoculum.
- **Le troisième chapitre :** est relatif à l'influence des paramètres lies aux facteurs de l'environnement dont la température, l'Humidité , le sol et des effet des pratiques culturales de l'homme et les mesures de contrôle sur la dissémination des épidémies.
- **Le quatrième chapitre :** dans ce chapitre la modélisation des épidémies a été expliquée on se basant sur les bases de la modélisation et les différents modelés utiliser en

épidémiologie végétale et terminer par des exemples d'application de simulation informatique des épidémies

- **Le cinquième chapitre :** traite les différents paramètres influençant la réduction des épidémies dont réduction de l'inoculum  $X_0$  et le taux d'accroissement de la maladie.
- **Le sixième chapitre :** les notions fondamentales relatives aux avertissements phytosanitaires par la prévision d'apparition des symptômes et en expliquant des exemples de systèmes de prévision informatisés des maladies agricoles utilisés dans le monde.
- **Le septième chapitre :** nous avons jugé utile de rajouter ce chapitre sur les nouveaux outils utilisés en épidémiologie végétale à fin de mettre l'étudiant avec les nouveaux outils utilisés en épidémiologie végétale tels que les GPS et les SIG.

## Table des matières

1-INTRODUCTION-----	1
2- HISTORIQUE -----	3
3-QUELQUES DEFINITIONS NECESSAIRES -----	3
3-1-Epidemie-----	3
3-2-Endemie-----	3
3-3-Epiphytie-----	4
3-4-Pandémie -----	4
3-5-Epidémiologie-----	4
4-Champs de l'épidémiologie -----	5
4-1-Echelle épidémiologique -----	5
4-2-Origine des épidémies -----	7
4-3-Le cycle de base d'une épidémie-----	8
4-4-Cycle de développement des maladies -----	9
4-5-La dynamique des épidémies -----	9
4-5-1-Le cycle monocyclique-----	10
4-5-2-Le cycle polycyclique -----	10
4-5-3-La combinaison de deux cycles -----	11
4-5-4-Le cycle polyétique -----	11
4-5-5-Le monocycle et ses compartiments -----	12
CHAPITRE I : LES PARAMETRES RELATIFS A L'HOTE -----	16
1-1Expérimentation en épidémiologie -----	16
1-1-1-Expérimentation en conditions contrôlées : -----	16
1-1-2-Expérimentation en conditions contrôlées ou semi-contrôlées : -----	16
1-2-Estimation des intensités de la maladie -----	16
1-1-1-Quantifier le parasite -----	16
1-1-2-Relation entre intensité des symptômes et des rendements -----	19
CHAPITRE II : LES PARAMETRES RELATIFS AUX AGENTS PATHOGENES -----	20
2-1-Conservation de l'inoculum -----	20
2-1-1-Degré de virulence -----	20
2-1-2-Quantité d'inoculum près de l'hôte -----	20
2-1-3-Type de reproduction de l'agent pathogène -----	20
2-1-4-Écologie de l'agent pathogène-----	21

2-2-Dispersion de l'inoculum -----	21
2-2-1-Transmission par la semence -----	21
2-2-2-Transmission par le Pollen-----	22
2-2-3- Transmission par le matériel de propagation des plants -----	22
2-2-4- Transmission par le vent -----	22
2-2-5- Transmission par l'eau -----	22
2-2-6- Transmission par les champignons et les nématodes -----	23
2-2-7- Transmission par les insectes et les acariens -----	23
<b>CHAPITRE III : LES PARAMETRES LIES AUX FACTEURS DE</b>	
<b>L'ENVIRONNEMENT -----</b>	<b>25</b>
3-1-L'humidité-----	25
3-2-Temperature-----	25
3-3-Le sol-----	27
3-4-Effet des pratiques culturales de l'homme et mesures de contrôle -----	27
3-4-1-Choix du site et Préparation -----	27
3-4-2-Sélection de matériel de multiplication -----	27
3-4-3-Pratiques culturales -----	28
3-4-4-Mesures de contrôle des maladies -----	28
3-4-5-Introduction de nouveaux agents pathogènes-----	28
<b>CHAPITRE IV : LA MODELISATION DES EPIDEMIES -----</b>	<b>29</b>
4-1-Bases de la modélisation -----	29
4-1-1-Etapes de la modélisation -----	29
4-2-Modelés utiliser en épidémiologie végétale -----	30
4-2-1-Modèles statistiques -----	30
4-2-2-Modèles mécanistes -----	31
4-2-3-Modèle prédictif-----	31
4-3-Simulation informatique des épidémies-----	31
<b>CHAPITRE V : LA REDUCTION DES EPIDEMIES-----</b>	<b>36</b>
5.1. Réduction de l'inoculum $X_0$ -----	36
5-2-Réduction du taux d'accroissement $r$ -----	38
5-3-Action sur $t$ -----	39
<b>CHAPITRE VI : LES AVERTISSEMENTS PHYTOSANITAIRES-----</b>	<b>40</b>
6-1-La prévision d'apparition des symptômes -----	40

6-2-Avertissements basés sur l'évaluation du taux d'accroissement d'une maladie épidémique -----	40
6-3-Avertissements basés sur la mesure de l'inoculum-----	43
6-4-Systèmes de prévision des maladies agricoles -----	44
6-4-1-Etapes de prévision des maladies agricoles -----	45
6-4-2-Exemples de systèmes de prévision des maladies agricoles -----	47
7- NOUVEAUX OUTILS UTILISES EN EPIDEMIOLOGIE VEGETALE -----	50
7-1-les outils moléculaires -----	50
7-2-Système d'information géographique (SIG)-----	50
7-3-Système de positionnement global(GPS) -----	51

## Tables des figures

Figure 1: Diagramme schématique des interrelations des facteurs impliqués dans les épidémies de maladies des plantes. D'après Agrios, 2005 -----	5
Figure 2 : Place de l'épidémiologie dans les espaces, emboîtés, caractéristiques des relations entre population Hôte-population parasites (adapté par de Demarly, 1977).----	6
Figure 3 : Différents niveaux d'étude des interactions hôtes-pathogènes(d'après Rapilly, 1991). -----	7
Figure 4 : Cycle d'évolution d'une épidémie -----	9
Figure 5: Cycle de développement des maladies (d'après Rapilly, 1991). -----	9
Figure 6: Développement polycyclique d'une maladie dans une population de plantes-hôtes (D'après Sache ,2003). -----	10
Figure 7 : Enchaînement des variables d'états de la maladie qui constituent le cycle de base de l'épidémie (d'après Rapilly, 1991).-----	15
Figure 8: Evolution spatiale et temporelle du chancre du citronnier (Gottwald et al.,1989).-----	17
Figure 9 : Les clés d'évaluation visuelle de la sévérité de quatre maladies : maladie des tâches communes de la luzerne, septoriose du blé, brûlure bactérienne du haricot, pourriture bactérienne molle de la pomme de terre (James, 1971).-----	18
Figure 10 : Clé d'évaluation descriptive de l'infection de Pois-chiches par <i>Ascochyta rabiei</i> -----	19
Figure 11 : Distance de dissémination des agents pathogènes par différents vecteurs. (1) zoospores ; (2) nématodes ; (3) formes aptères de pucerons ; (4) formes ailées de pucerons ;(5) cicadelles. D'après Sache, 2003 -----	24
Figure 12 : Classification des variables pathogène, hôte et environnement -----	32
Figure 13: Model describing the effect of temperature and leaf wetness duration on the ability of the bean rust fungus <i>Uromyces appendiculatus</i> to cause disease. The maximum disease reached at 15°C and 24 hours of leaf wetness is given the maximum value of 1.0. [From Berger et al. (1995). -----	32
Figure 14 : Principales étapes d'ajustement de Proculture via le Web. Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver (D'après Eljarroudi, 2005)-----	33
Figure 15: Development and spread of citrus canker disease, caused by the bacterium <i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>citri</i> , from a single inoculated plant (focus) in three citrus nurseries on the indicated days after inoculation. SWN, Swingle rootstock nursery; PON, Pinalbe orange nursery; DGN, Duncan grapefruit nursery. Citrus canker developed fastest in the Duncan nursery and slowest in the Swingle nursery. [From Gottwald et al. (1989). -----	34
Figure 16. L'évolution du facteur d'infection des fraises par l'anthracnose avec le temps dans les régions de Floride aux Etats Unis, figure reproduite à partir de [AgroClimate]. -----	35

Figure 17 : Répartition des risques de la fusariose du blé sur les régions de Dakota du nord aux ´ Etats Unis, figure reproduire à partir de [FHBPC 04]. -----	35
Figure 18 : Recommandations de traitements chimiques contre le mildiou de la Pomme de terre (D’après Lepoivre, 2003).-----	42
Figure 19 : Exemple de construction d’un modèle prédictif pour la fusariose du blé, à l’aide d’un algorithme de classification. -----	46
Figure 20 : Schéma montrant l’objectif principal du modèle d’avertissement (D’après Eldjarodie, 2005) -----	46

## 1-INTRODUCTION

Depuis que les agriculteurs cultivent des plantes, ils ont été confrontés aux pertes de rendement dues aux maladies des plantes. Une maladie survient sur une plante, lorsqu'un pathogène virulent et un hôte interagissent dans un environnement propice. Comparés aux écosystèmes naturels, **les agrosystèmes** offrent en effet des conditions très favorables à la propagation des parasites. Les progrès de l'agriculture ont facilité le développement des maladies parasitaires

Pour qu'une maladie se développe, il faut trois composantes :

- un pathogène ;
- un hôte ;
- un environnement favorable

La maladie devient importante quand les dommages causés par l'extension de la maladie ont des impacts sociaux et économiques importants.

Lorsqu'un agent pathogène se propage et affecte de nombreux individus au sein d'une population sur une zone relativement vaste et dans un laps de temps relativement court, le phénomène est appelé épidémie. Une épidémie a été définie comme toute augmentation de la maladie dans une population.

Une épidémie est la dynamique de changement des maladies des plantes dans le temps et dans l'espace. C'est la survenue d'une maladie dans une population ou une région avec une fréquence nettement plus élevée par rapport à sa fréquence habituelle.

Comprendre les épidémies des maladies est un enjeu majeur pour la gestion des pathogènes. Pour identifier les réservoirs de ces pathogènes et comprendre les facteurs structurants leurs populations, il est indispensable de disposer d'outils d'identification et de génotypage fiables et rapides.

Il y a de nombreux exemples d'épidémie qui ont marqué l'histoire et qui illustrent l'interaction entre le pathogène, l'hôte et l'environnement.

- **Le mildiou et la famine irlandaise de 1840**

Trois composantes ont été réunies pour le développement de cette épidémie :

- L'hôte : la pomme de terre, cultivée en grande quantité ;
- Un environnement propice : le climat frais et humide en Irlande ;

- L'agent pathogène : *Phytophthora infestans*, a été introduit en Irlande en 1844, le dernier composant nécessaire au développement de la maladie.

L'épidémie provoqua de fortes pertes, entraînant une famine de grande ampleur.

- **Bayoud du palmier dattier en Algérie**

Bayoud (*Fusarium oxysporum*) fait disparaître progressivement les palmiers dattiers dans le nord-ouest Algérien. Les données épidémiologiques ont signalé que le Bayoud fut observé pour la première fois vers 1870 dans la vallée du Draa au nord de Zagora (Sud du Maroc). Il a ensuite progressé vers l'ouest et surtout vers l'est en Algérie. Les facteurs de progression et d'extension de Bayoud du palmier dattier en Algérie ont été définis comme suit :

- l'utilisation des cultivars sensibles,
  - le transfert des rejets, rachis et sols contaminés,
  - l'application des itinéraires techniques faux qui favorisent l'extension de maladie comme l'irrigation à la raie ou gravitaire,
  - l'utilisation des outils contaminés pendant l'arrachage,
  - la pollinisation et la récolte.
- **La famine du Bengale de 1943** a été causée par l'épidémie de taches brunes du riz à *Cochliobolus* (*Helminthosporium* du Riz). a anéanti pratiquement toutes les productions de riz qui a provoqué une famine de grande ampleur. Elle a entraîné des milliers de morts et des migrations massifs.
  - **Le mildiou de la pomme de terre (*Phytophthora infestans*) en 2006-2007** fait disparaître la totalité de la production dans le centre et le nord-ouest Algérien.
  - **Le Feu bactérien des arbres fruitier (*Erwinia amylovora*) en 2010** : a contaminé plus de 20 millions d'arbres fruitiers à l'instar du pommier, du poirier, du néflier et du cognassier au niveau des régions du centre et 7 millions d'arbres dans les Hauts-Plateaux en Algérie recensés en 2011.

La plupart des épidémies sont plus ou moins localisées et entraînent des pertes mineures à modérées. Certaines épidémies sont naturellement maîtrisées, par exemple par des changements dans les conditions météorologiques. D'autres sont maîtrisés par des pulvérisations chimiques et d'autres mesures de contrôle. Parfois, cependant, certaines épidémies apparaissent soudainement, deviennent incontrôlables et deviennent extrêmement étendues ou graves sur une espèce végétale particulière.

## 2- Historique

Sous l'Antiquité, les fêtes données pour apaiser le Dieu Robigo montrent que l'assimilation des épidémies de rouille sur céréales aux calamités agricoles existait déjà.

En pathologie végétale le terme d'épidémie a été utilisé pour la première fois, par

➤ **Duhamel de Montceau en 1728** en France. Cet auteur écrit pour relater ses observations sur un dépérissement du safran :

«J'ai été surpris des désordres que cause cette maladie (la mort) dans des endroits qui ont les malheurs d'en être affligés. Et qui ne le serait pas en effet de voir qu'une plante attaquée par la maladie devient meurtrière pour les autres de son espèce ? En avait-on jusqu'ici remarqué des contagieuses épidémiques dans les plantes ? »

Après deux siècles, de nombreux scientifiques se sont intéressés à l'épidémiologie végétale.

- **Jones (1913)** a mis en évidence le rôle et l'importance de l'environnement dans l'apparition des maladies et des épidémies.
- **Gauman(1946)** a étudié le mode de dispersion et de désamination des agents pathogènes. C'est le premier à avoir introduit le cycle de la maladie.
- **Large (1952)** a introduit la notion d'évaluation des pertes dues aux épidémies. Ayant le premier à avoir introduit la notion de quantification de la maladie.
- **Horsfall et Dimond(1960)**, ils ont introduit la technique de prédiction et la détermination de la densité d'inoculum.
- **Vander Planck (1963)**. Ayant le premier à avoir édité un ouvrage dédié à l'épidémiologie végétale. Il est considéré comme étant le père de l'épidémiologie végétale.

## 3-Quelques définitions nécessaires

### 3-1-Epidemie

Du grec epi "sur" et demos "le peuple" désigne l'augmentation rapide de l'incidence d'une maladie en un lieu donné sur un moment donné.

### 3-2-Endemie

À l'opposé des épidémies on observe des maladies **endémiques** ; celles-ci correspondent à des maladies réparties de façon homogène ou hétérogène mais qui ne touchent qu'un faible nombre d'individus.

La fréquence des plantes malades reste **basse et relativement constante** au cours du temps ; ce qui ne veut pas dire que l'impact agronomique d'une endémie est faible. Une autre caractéristique de l'endémie est que **la présence du parasite est permanente**. Cet état endémique peut être parfois le précurseur de l'état épidémique.

### **3-3-Epiphytie**

Du grec "phyton" plante désigne une maladie qui atteint rapidement un grand nombre de végétaux de la même espèce.

### **3-4-Pandémie**

Du grec pan "tous" et demos "peuple" est une épidémie présente sur une large zone géographique.

### **3-5-Epidémiologie**

**« L'épidémiologie étudie les maladies causées par des populations d'organismes pathogènes au sein de peuplements végétaux.**

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

Le développement des agents pathogènes devient très rapide si les conditions climatiques sont favorables. Ainsi, au travers plusieurs travaux de recherche en phytopathologie, il s'est affirmé qu'il y a une interaction entre l'hôte (la plante), le climat et les agents causaux des maladies.

Cette interaction est appelée « triangle des maladies ». Une quatrième dimension qui est le temps a été ajoutée, on parle maintenant d'une pyramide des maladies vu que l'épidémie végétale apparaît lorsque les périodes d'interférence entre les éléments du triangle sont prolongées (des jours, des heures etc.) et où l'Homme joue un rôle important Fig1.

L'étude inclut les maladies causées par tous les types d'organismes pathogènes et tous les peuplements végétaux hôtes, qu'il s'agisse de plantes cultivées au sein des systèmes de production agricole ou de populations d'hôtes " sauvages, au sein d'écosystèmes plus ou moins naturels.

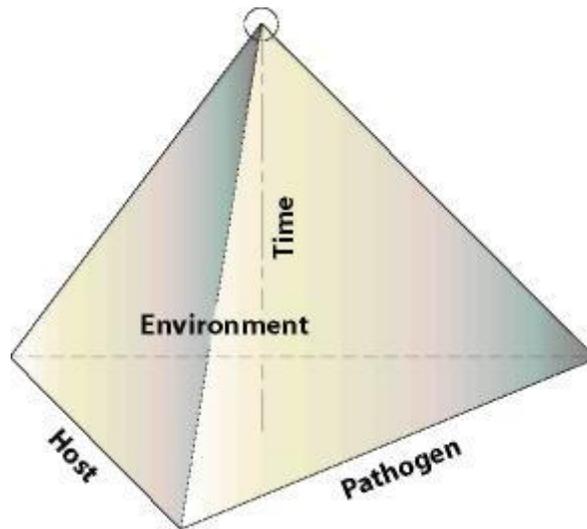


Figure 1: Diagramme schématique des interrelations des facteurs impliqués dans les épidémies de maladies des plantes. D'après Agrios, 2005

Nombreuses épidémies végétal sont de type pandémique : c'est le cas le *Phytophthora infestant*, *Xylella fastidiosa*, *Pucciniastrii formis*.

#### 4-Champs de l'épidémiologie

##### 4-1-Echelle épidémiologique

Les champs de l'épidémiologie Il est nécessaire de préciser les champs ou domaines d'études dont traitent les travaux d'épidémiologie par rapport aux divers niveaux successifs et emboîtés qui font l'objet de recherches en pathologie végétale Fig.1et3.

**Niveau A** : C'est de la dimension des nations voire des continents ; il concerne les problèmes de réglementations phytosanitaires aux frontières et donc tous les aspects du diagnostic des agents pathogènes. Par rapport à l'épidémiologie il concerne la géophytopathologie et l'établissement à l'échelle macro-climatique de prévisions de risques.

**Niveau B** : C'est celui des espaces socio-économique et écologique qui ont un poids très important pour la perception de la nuisibilité d'une épidémie mais aussi dans la définition de l'usage des moyens dont dispose la société pour contrôler celle-ci.

**Niveau C** : C'est celui de la phytotechnie dont l'agriculteur à la maîtrise mais dans les limites des degrés de liberté que lui laissent les systèmes d'exploitation et de production qu'il a retenus. C'est la gestion de ce domaine tant dans le temps que dans l'espace qui conditionne, pour de nombreuses maladies, la quantité, la qualité et la répartition spatiale de l'inoculum.

**Niveau D :** correspond à l'espace d'entrée de l'épidémiologie. Il régit les interactions entre populations végétale et parasitaire qui sont elles-mêmes gouvernées, pour partie, par le mésoclimat tant aérien que tellurique. C'est cet espace que les progrès réalisés en télédétection, permettront de suivre de manière de plus en plus précise. La prise en compte des interactions entre les populations hôte et parasitaire permet d'appréhender l'évolution qualitative et quantitative de la structure génétique des populations parasites suites aux pressions exercées par les hôtes et leurs modes de conduite.

**Niveau E :** C'est l'interface entre hôte et pathogène. Il marque les études les plus fines : tissulaire, cellulaire, moléculaire entre un hôte et son parasite

**Niveau F, G, H :** C'est le niveau des relations individuelles gouvernant la défense de l'hôte et l'attaque du parasite selon les aspects cytologiques, physiologiques et biochimiques.

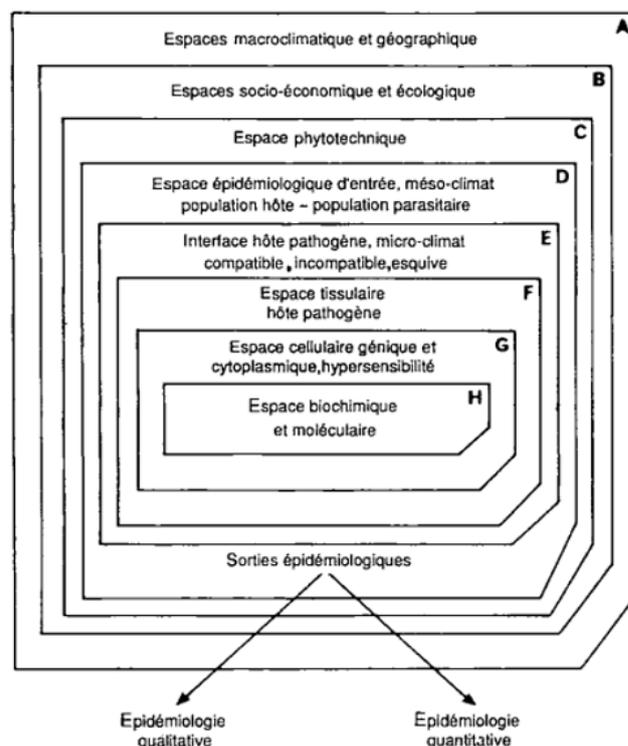


Figure 2 : Place de l'épidémiologie dans les espaces, emboîtés, caractéristiques des relations entre population Hôte-population parasites (adapté par de Demarly, 1977).

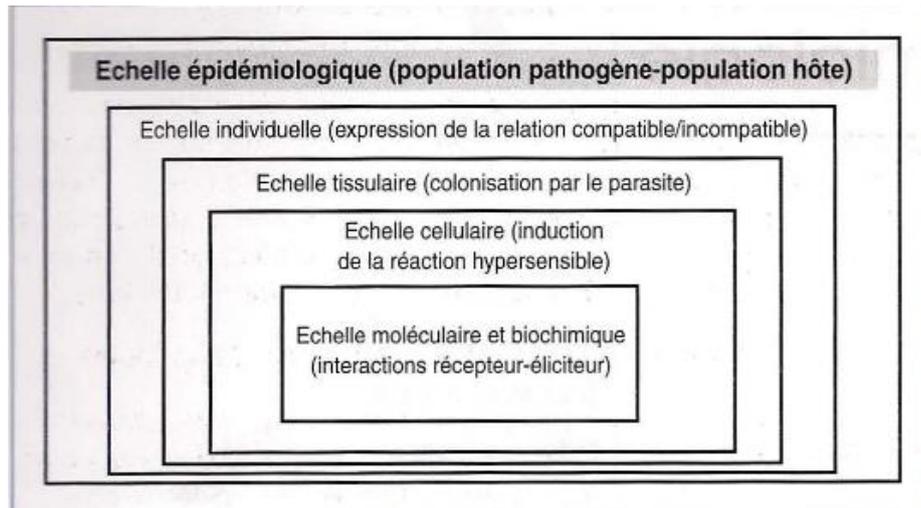


Figure 3 : Différents niveaux d'étude des interactions hôtes-pathogènes(d'après Rappilly, 1991).

#### 4-2-Origine des épidémies

Le développement des maladies résulte de l'interaction entre les populations de parasites et les populations de plantes lorsque les plantes et les conditions de l'environnement permettent le développement du pathogène. On retrouve une situation d'équilibre dans les écosystèmes naturels : l'expansion du pathogène est quasiment nulle, la fréquence des maladies faible, les plantes autochtones ayant acquis une certaine tolérance ou résistance limitant la progression du pathogène .

C'est une endémie qui joue un rôle clé dans la conservation des pathogènes et leur diversification en pathotypes Fig.4.

Lors d'une épidémie,

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

1) une introduction d'un pathotype dans une région où les plantes ne possèdent pas de mécanismes de résistance,

2) l'apparition par mutation d'un nouveau pathotype (race) ayant une virulence accrue,

3) la culture intensive d'un cultivar sensible à un pathogène (écosystèmes artificiels : systèmes cultureux modernes).

#### 4-3-Le cycle de base d'une épidémie

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

**Inoculum primaire -> pollution -> infection -> symptômes -> libération du pathogène (inoculum secondaire) -> contagion**

1)-L'inoculum peut provenir d'une dissémination du pathogène d'une autre région où il était présent à l'état **endémique**, conservé dans des débris végétaux ou sur des hôtes secondaires.

**L'inoculum** : Élément(s) vivant(s) du parasite capable(s) de contaminer une plante-hôte. L'inoculum primaire est responsable de la pollution de l'hôte et permet à la maladie d'exister. L'inoculum secondaire apparaît sur la population-hôte déjà contaminée et permet la dissémination de la maladie.

2)-La maladie se développe sur les plantes contaminées par l'inoculum primaire avec ou sans **phase de latence** qui précède l'apparition des premiers symptômes.

3)- l'agent pathogène se développe aux dépens de son hôte, il y a **parasitisme : infection**

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

**C'est l'inoculum secondaire.**

**Propagation** : Elle respecte le cycle de base d'une épidémie. Sa vitesse est dépendante de la vitesse de multiplication du pathogène qui dépend elle-même de : la présence de réservoirs d'inoculum, sources de foyers primaires, la durée du cycle de base de l'épidémie (qui dépend de la durée du cycle du pathogène et détermine le nombre de cycles possibles par saison), les conditions climatiques (chaleur, humidité), l'usage ou non de pesticides (et leur efficacité), l'état des plantes hôtes (carences, blessures, état parfait, leurs caractéristiques génétiques responsables de résistances et tolérances).

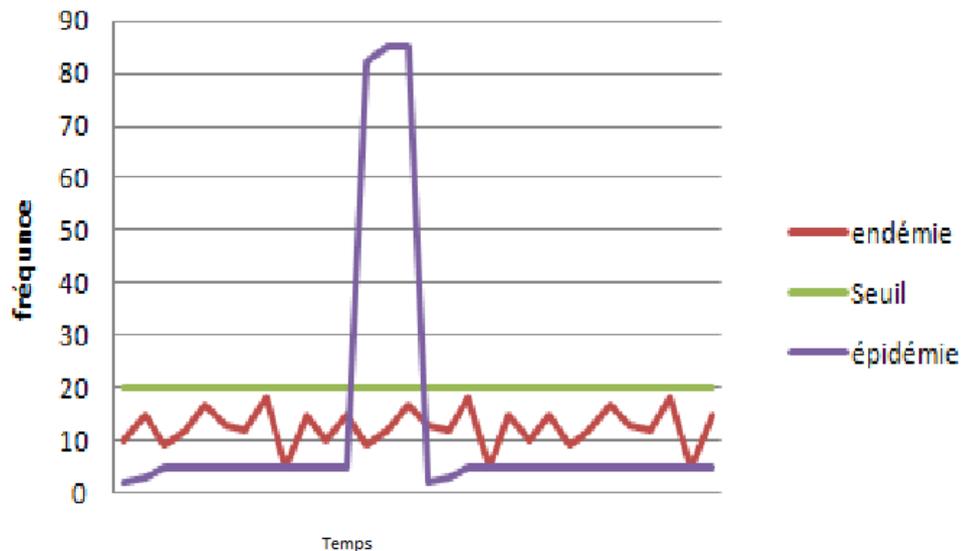


Figure 4 : Cycle d'évolution d'une épidémie

#### 4-4-Cycle de développement des maladies

La première observation d'une maladie est souvent précédée de plusieurs cycles de développement du pathogène après l'introduction du premier inoculum. Le développement d'une maladie est lent au début de l'épidémie. Les épidémies ne correspondent pas forcément à un développement rapide et grave d'une maladie, on parle d'épidémie lorsque il y a une augmentation d'une maladie dans le temps. Les maladies des plantes suivent le

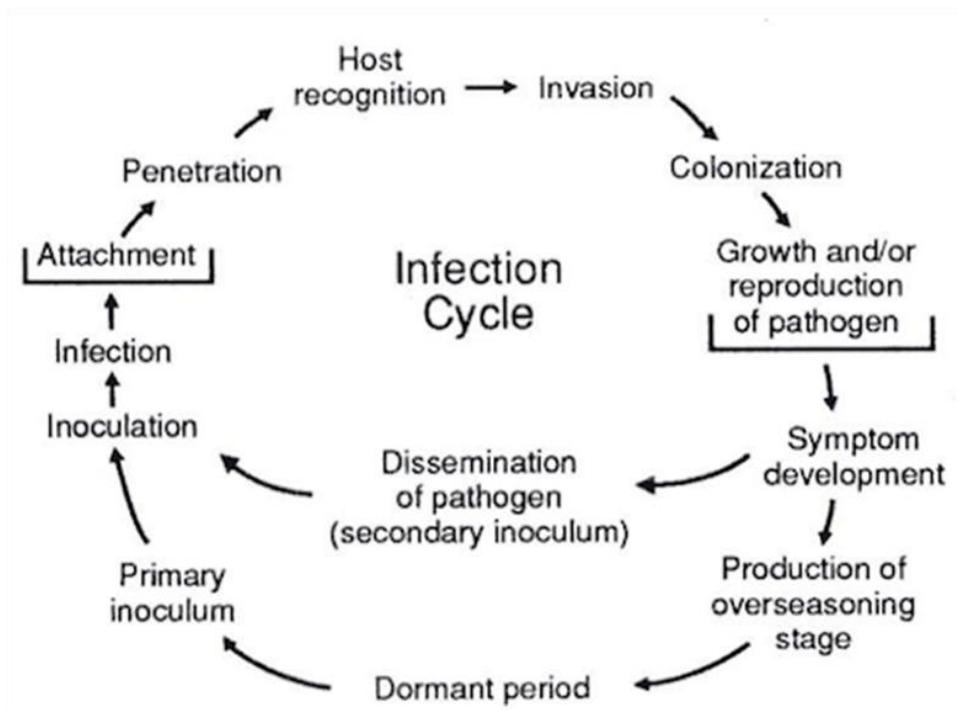


Figure 5: Cycle de développement des maladies (d'après Rapilly, 1991).

#### 4-5-La dynamique des épidémies

Le cycle épidémique de base peut être défini comme un ensemble de compartiments correspondant aux changements d'état du parasite de la maladie qui se succèdent sous l'effet de facteurs extérieurs à l'épidémie susceptibles d'influencer cette dernière Fig.6.

##### 4-5-1-Le cycle monocyclique

Pour un cycle monocyclique, le pathogène mis en jeux ne se reproduit qu'une seule fois en une saison donc **seul l'inoculum primaire est produit**. Les maladies dues à des pathogènes ayant un cycle monocyclique n'augmentent que d'une année sur l'autre. C'est le cas des pathogènes de certaines plantes annuelles comme des espèces de *Sclerotinia* qui causent la pourriture de la tige chez les arachides, la pourriture blanche des oignons ou encore les brûlures des tiges des tomates.

**Exemple :** *Sclerotium rolfsii* survit sous forme de sclérotés et ces formations germent pendant une période de croissance pour permettre l'infection. A la fin d'une période de croissance de nouveaux sclérotés sont produits sur les plantes infectés et ils servent d'inoculum pour la prochaine saison de croissance.

##### 4-5-2-Le cycle polycyclique

Pour un cycle polycyclique, les pathogènes responsables de l'infection des plantes se **multiplient plusieurs fois pendant une période de croissance**. Il y a dans ce cas production d'inoculum primaire et secondaire.

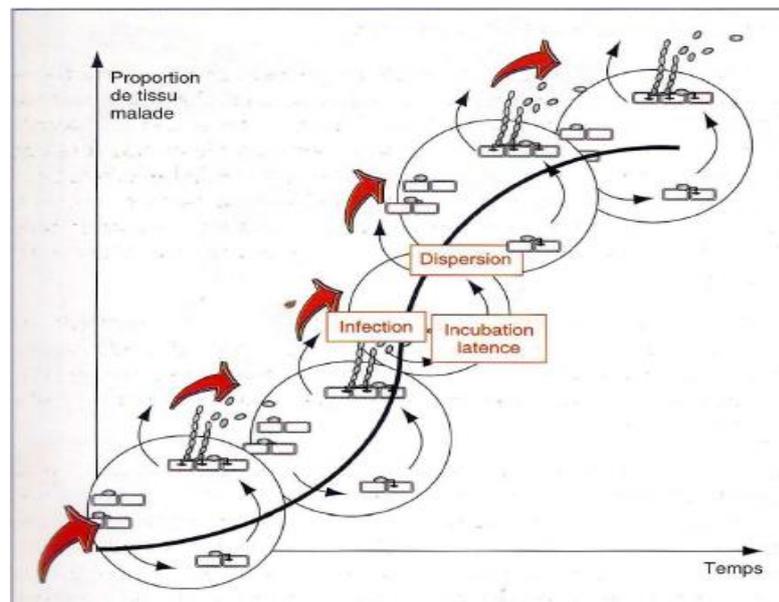


Figure 6: Développement polycyclique d'une maladie dans une population de plantes-hôtes (D'après Sache ,2003).

**Exemple :**

- Rouille
- Mildiou de la pomme de terre
- Oïdium
- Pourriture brune des fruits à noyau(Moniliose)
- Brûlure bactérienne
- Virus avec vecteurs
- Nématodes

Dans le cas du mildiou de la pomme de terre seul quelques pommes de terre infectées par *P. infestans* sont arrivées en Europe et ont permis la production de sporanges ou de zoospores. Ces dernières ont été facilement disséminées par le vent et ont infectés des nouvelles plantes qui ont à leur tour permis la production de nouveaux sporanges lorsque les conditions étaient optimum. En 90 jours de saison de croissance, ce cycle a pu se répéter 17 fois en augmentant l'intensité de la maladie à chaque cycle. Les maladies polycycliques sont présentes autant sur des plantes pérennes qu'annuelles et les maladies des plantes les plus destructives sont souvent des maladies polycycliques.

**4-5-3-La combinaison de deux cycles**

Certaines maladies peuvent se développer en combinant les deux cycles. C'est le cas de certaines maladies fongiques qui ont une seule source d'inoculum primaire mais deux modes de production de spores. Une reproduction sexuée et une autre végétative.

**Exemple :**

- La tavelure du pommier
- L'helminthosporiose du blé

**4-5-4-Le cycle polyétique**

Certains pathogènes causent des maladies qui sont polyétiques. Ce sont celles dont le cycle d'infection construit un inoculum primaire sur plusieurs années. La maladie met plusieurs années pour se développer à partir de l'infection et la gravité de la maladie augmente progressivement d'année en année. Par contre ces maladies peuvent avoir un cycle mono ou polycyclique.

### **Exemple :**

- **Monocyclique** : Maladie hollandaise de l'orme
- **Polycyclique** : oïdium

### **4-5-5-Le monocycle et ses compartiments**

- **Infection**

Le compartiment d'infection peut être divisé en processus séquentiels et la réalisation complète est indispensable au succès de l'infection.

- Chez les champignons, l'humectation continue (présence d'un film d'eau à la surface des organes végétaux dans une situation de rosé est fréquemment indispensable à la germination des spores et leurs pénétration de l'hyphe infectieux.

Certains parasites utilisent plusieurs périodes successives d'humectation pour mener à bien le processus d'infection, et peuvent ainsi se développer dans des zones particulièrement arides.

- Une telle adaptation explique la présence du mildiou de la pomme de terre dans les zones arides.
- Les oïdiums constituent une exception, leurs spores étant capables de germer à sec, ce qui leur permet d'être adaptés à une large gamme de conditions environnementales.

La température module l'efficacité du processus d'infection en fonction de températures cardinales (minimale, optimale et maximale) propres à chaque espèce. La connaissance des relations entre l'infection, la température et la durée d'humectation sont la base de nombreux modèles de prévision des épidémies.

- **Latence**

La période de latence correspond au laps de temps écoulé entre l'infection et la production de germes infectieux

La période de latence dépend essentiellement de la compatibilité de la relation hôte-parasite et de la température. Elle diminue également avec la densité de l'infection, ce

qui semble indiquer qu'une biomasse parasitaire critique est nécessaire pour déclencher la sporulation.

Dans de nombreux pathosystèmes, la durée de la période de latence est une fonction inverse de la température avec un optimum qui peut différer des optima associés à la sporulation ou à l'infection.

Concrètement cette période de latence peut être définie sur base de l'éruption de la première lésion sporulante, de l'éruption de 50 % du nombre final de lésions sporulantes ou de l'éruption de la dernière lésion sporulante.

La période de latence peut également constituer un bon indicateur de la résistance partielle de variétés vis-à-vis de certains agents pathogènes.

- **Sporulation**

Le laps de temps pendant lequel une lésion produit des spores est appelé période infectieuse.

La mesure régulière de la quantité de spores produites permet en général de tracer des courbes en forme de cloche. Plusieurs pics successifs de sporulation peuvent indiquer des contaminations secondaires.

Il existe souvent une compensation entre l'efficacité infectieuse des spores, la durée de la période infectieuse et la quantité de spores produites par lésion.

### **Exemple**

- Les mildious produisent pendant quelques jours seulement (suite à la mort rapide de l'organe parasité) des quantités très élevées de spores peu infectieuses et très sensibles aux facteurs environnementaux.
- Les urédinales produisent en général moins de spores montrant une efficacité infectieuse plus élevée et moins sensible aux facteurs extérieurs grâce à leur pigmentation et à leur résistance mécanique de leur paroi.
- Les oïdiums font exception, en produisant de très nombreuses spores dont l'efficacité est très élevée jusqu'à 50%. En outre, la période infectieuse de ces parasites, qui maintiennent leurs tissus-hôtes en survie, est prolongée d'autant.
- La production de spores par les champignons telluriques est difficile à quantifier.

- **Dissémination (libération, transport et dépôt)**

La dissémination des germes étend l'épidémie dans l'espace. Les mécanismes mis en jeu pour disperser les particules infectieuses déterminent l'échelle du phénomène, qui peut aller de la réinfection l'organe producteur d'inoculum à la dispersion intercontinentale celui-ci.

La libération met en jeu des mécanismes biophysiques liés à la structure des organes sporifères.

- Les mécanismes sont dits **actifs** lorsque c'est l'organe sporifère lui-même qui fournit l'énergie nécessaire à la libération (cas des mécanismes d'éjection ou de décharge, qui permettent la libération des ascospores et des basidiospores).
- Les mécanismes de libération sont dits **passifs** lorsque l'organe sporifère ne contribue pas à la libération des spores. L'arrachage des spores par le vent est très fréquent chez les parasites aériens dont les spores sont présentées librement à la surface des organes (Urédinales, oïdiums, *Botrytis* ...).

Le transport naturel le plus efficace s'effectue par voie aérienne, car de nombreuses spores ont des caractéristiques aérodynamiques leur permettant de rester très longtemps en suspension dans l'atmosphère.

Les agents biotiques de transport peuvent s'avérer très efficaces pour véhiculer des parasites. La distance à laquelle est disséminé un agent pathogène peut être déterminée par l'aire de dispersion de son vecteur.

Le cas des virus par les insectes

Les vers de terre semblent responsables de l'extension spatiale de la contamination des sols par certaines espèces de *Fusarium*

Le dépôt l'efficacité du dépôt dépend notamment des caractéristiques des plantes cibles (les feuilles de grandes surfaces, la présence de poils à la surface des feuilles a été supposée faciliter l'adhésion des spores).

L'effet global de la pluie sur le processus infectieux est négatif (lessivage des spores). Des évaluations effectuées à partir de piégeage de spores : un dépôt de plus de  $10^9$  spores de *Puccinia graminis* f.sp. *tritici* (rouille noire du blé) par hectare pendant la période de sensibilité de la culture (400 spores/m<sup>2</sup> de blé étant suffisant pour déclencher une épidémie généralisée au sein d'une parcelle).

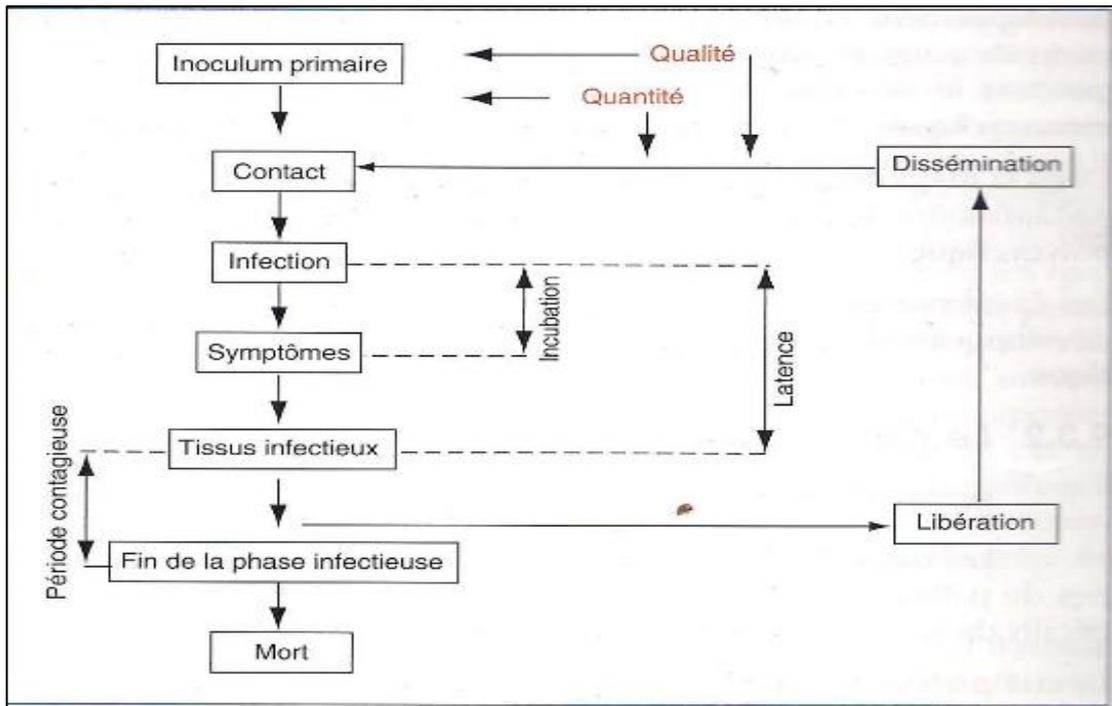


Figure 7 : Enchaînement des variables d'états de la maladie qui constituent le cycle de base de l'épidémie (d'après Rapilly, 1991).

## **CHAPITRE I : LES PARAMETRES RELATIFS A L'HOTE**

### **1-1-Expérimentation en épidémiologie**

L'étude expérimentale d'un système aussi complexe déterminé par l'interaction tripartite entre un peuplement végétal, une population parasite et l'environnement nécessite définition de l'échelle à laquelle elle doit être réalisée. La variabilité biologique des systèmes et le grand nombre de facteurs mis en jeu doivent entraîner la mise en place de dispositifs complexes satisfaisant aux exigences de la statistique.

En règle générale, plus l'échelle d'étude augmente et se rapproche de la réalité agronomique, plus les facteurs à prendre en compte sont nombreux et difficilement contrôlables, plus les résultats sont incertains et d'une portée limitée sur un plan statistique. En revanche, une plus grande échelle d'étude permet de mieux appréhender de nombreux facteurs et leurs interactions, ce que les études, souvent réductionnistes, effectuées à très petite échelle ne peuvent réaliser.

#### **1-1-1-Expérimentation en conditions contrôlées :**

**Interactions parasite x environnement :** Les enceintes climatiques modernes permettent de contrôler les facteurs environnementaux (température, éclairage, hygrométrie ... ), d'étudier l'effet de leur variation ou de leur intermittence sur le comportement des parasites, d'individualiser les effets des divers facteurs et de définir ceux qui expliquent le mieux la dynamique épidémique globale observée au champ.

**Interactions parasite x plante :** Les enceintes en serres correctement régulées permettent de reproduire l'interaction entre une population parasite et des plantes adultes.

#### **1-1-2-Expérimentation en conditions contrôlées ou semi-contrôlées :**

**Interactions plante x pathogène :** L'expérimentation au champ se rapproche des conditions agricoles réelles, mais est hasardeuse en raison des faibles moyens d'action de l'expérimentateur sur le déroulement de l'essai. Chaque unité expérimentale (parcelle, verger...) correspond à une situation épidémiologique unique. L'interprétation des résultats peut s'en trouver compliquée par les faibles niveaux de signification statistique.

### **1-2-Estimation des intensités de la maladie**

#### **1-1-1-Quantifier le parasite**

Quantifier une maladie repose sur les notions d'**incidence** et de **sévérité**.

- **L'incidence** : mesure la proportion de plantes malades au sein d'une unité expérimentale donnée, indépendamment de la gravité de l'attaque individuelle de chaque plante. Elle se traduit par une notation binaire de type plante malade 1 plante saine. Une telle mesure est bien adaptée aux maladies virales (maladie systémique) et aux études épidémiologiques ne nécessitant pas une étude fine, par exemple, au sein de peuplements forestiers. Ce type de notation est inapproprié lorsque la maladie contamine rapidement toutes les plantes de l'unité expérimentale, mais avec des degrés d'attaque et des conséquences diverses en terme de survie et de rendement.

La fréquence d'une maladie peut se mesurer à la fois dans le temps et dans l'espace. Le graphe suivant(Fig.8) représente l'évolution d'une maladie polycyclique, le Chancre du Citronnier provoqué par *Xanthomonas axonopodis*.

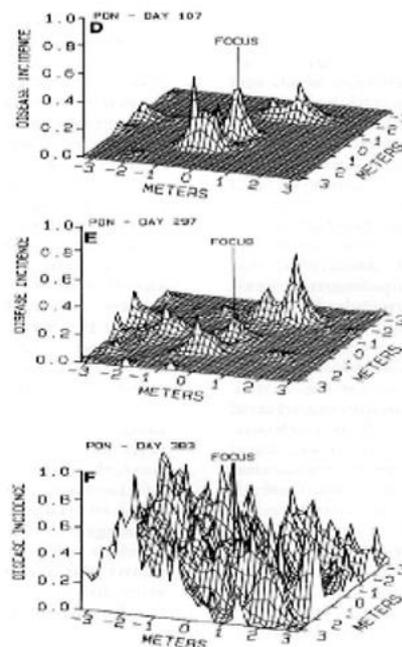


Figure 8: Evolution spatiale et temporelle du chancre du citronnier (Gottwald et al.,1989).

- **la sévérité (la notation quantitative)** : mesure la quantité de maladie sur un organe. La mesure idéale de la sévérité consiste à dénombrer toutes les lésions présentes sur une surface donnée ce qui n'est réalisable que pour des expérimentations réalisées en conditions contrôlées sur un petit nombre de plantes et avec des densités de lésions faibles. Au champ, la sévérité peut être évaluée à partir de diagrammes illustrés reproduisant des organes couverts de lésions réparties de manière uniforme. Des

logiciels ont été développés afin de présenter à l'expérimentateur des situations proches de la réalité, permettant de prendre en compte l'hétérogénéité de la répartition des symptômes et la possible confusion avec les symptômes dus à d'autres maladies, à des stress non parasitaires, ou à la sénescence normale des plantes. La notation de sévérité nécessite un entraînement préalable et d'importantes variations entre les notations effectuées par un même expérimentateur ou par plusieurs expérimentateurs ont été rapportées Fig.9.

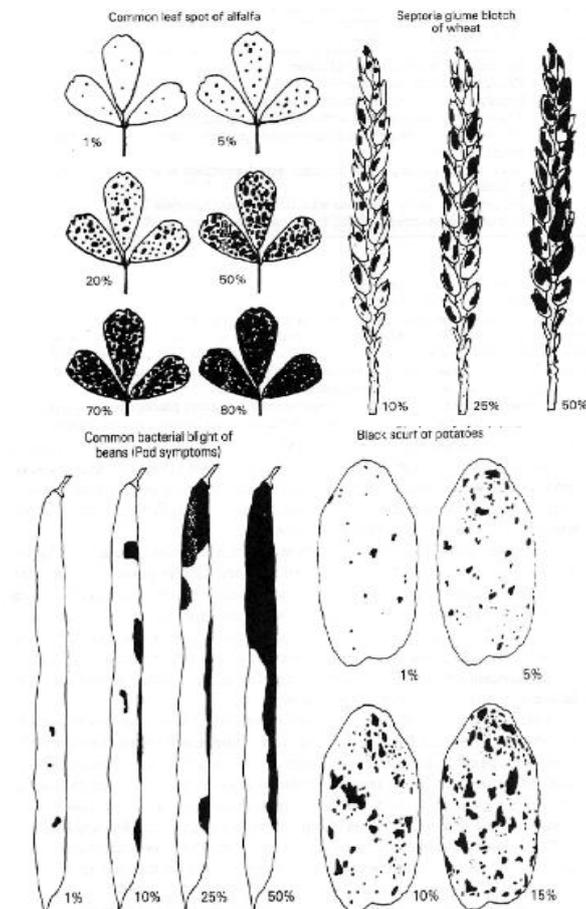


Fig. 7.2 A selection of disease assessment keys (after James, 1971)

Figure 9 : Les clés d'évaluation visuelle de la sévérité de quatre maladies : maladie des tâches communes de la luzerne, septoriose du blé, brûlure bactérienne du haricot, pourriture bactérienne molle de la pomme de terre (James, 1971).

**La notation semi-quantitative** se base également sur des clés d'évaluation visuelles ou descriptives, cependant la notation se fait par niveau de sévérité, généralement de 0 à 10, et non par pourcentage. Cette notation est donc moins précise que les pourcentages mais plus facile à utiliser.

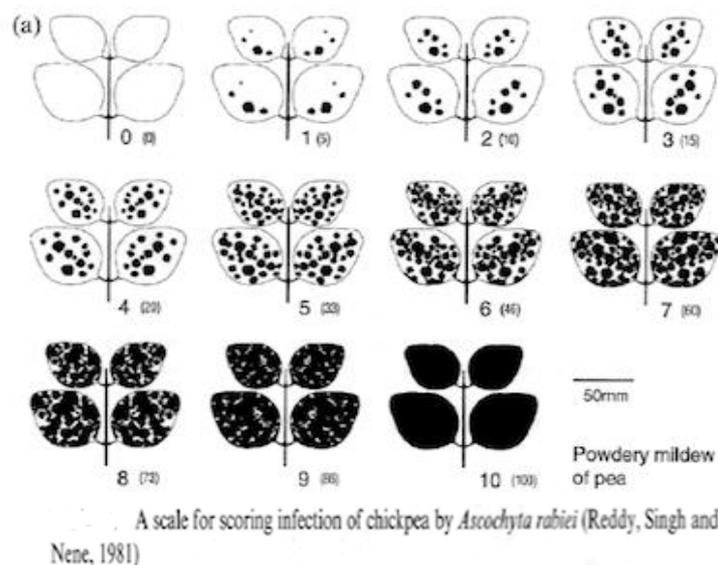


Figure 10 : Clé d'évaluation descriptive de l'infection de Pois-chiches par *Ascochyta rabiei*

### 1-1-2-Relation entre intensité des symptômes et des rendements

Les relations existant entre l'intensité des symptômes et le rendement peuvent être concrétisées par deux types de modèles mathématiques : les modèles à point critiques et les modèles à points multiples.

#### 1-1-2-1- Modèles à point critique

Ces modèles permettent l'estimation des pertes à partir de l'évaluation de l'intensité d'une maladie à un stade déterminé d'une culture. Il s'agit généralement d'une régression linéaire où la mesure de la maladie est la variable indépendante et où le pourcentage de perte de rendement représente la variable dépendante.

La recherche d'un modèle de prévision de Y en fonction de X

$$E(Y) = f(X) = B_0 + B_1X$$

#### 1-1-2-2- Modèles à points multiples

Les modèles à points multiples utilisent des équations de régression dont la forme générale

$$Y = b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \text{ où}$$

Y représente le pourcentage de perte de rendement et

$X_1, X_2, X_n$  sont les niveaux de maladie à différents moments de la culture.

De tels modèles ont été développés pour le mildiou de la pomme de terre et pour la rouille brune du froment (Blé tendre : *Triticum aestivum*).

## **CHAPITRE II : LES PARAMETRES RELATIFS AUX AGENTS PATHOGENES**

### **2-1-Conservation de l'inoculum**

#### **2-1-1-Degré de virulence**

Les Pathogènes virulents sont capables d'infecter plus rapide l'hôte, d'assurer rapidement une production d'inoculum et en grande quantité que les pathogènes de moindre virulence.

#### **2-1-2-Quantité d'inoculum près de l'hôte**

Plus le nombre de propagules pathogènes (bactéries, spores fongiques et les sclérotés, œufs de nématodes, les plantes infectées par des virus, etc.) se trouve à l'intérieur ou dans des zones proches des plantes hôtes, plus inoculum atteint l'hôte précocement, augmentant ainsi les chances d'une épidémie importante.

#### **2-1-3-Type de reproduction de l'agent pathogène**

Certaines plantes pathogènes, champignons, les bactéries et les virus ont des cycles de reproduction courts et sont donc polycyclique (produire plusieurs générations en une seule saison de croissance).

Les Pathogènes polycycliques comprennent champignons qui causent des rouilles, mildious et taches foliaires et sont responsables de la plupart des catastrophiques épidémies brusque dans le monde.

Certains champignons du sol, tels que *Fusarium* et *Verticillium* et la plupart des nématodes ont généralement entre un et quelques (jusqu'à quatre) cycles de reproduction par saison de croissance.

Plusieurs agents pathogènes, tels que les charbons et plusieurs rouilles à cycle court, exigent une année entière pour compléter un cycle de vie (agents pathogènes monocycliques) et peuvent cause une seule infections par an.

Dans ces maladies monocycliques, l'inoculum accumule d'une année à l'autre et l'épidémie est généralement polyptique (elle se développe sur plusieurs années).

De même, des épidémies causées par des pathogènes qui nécessitent plus d'un an pour compléter un cycle de reproduction sont lents à se développer. Les exemples sont rouille du cèdre à pomme (2 ans), la rouille vésiculeuse du pin blanc (3-6 ans).

Ces agents pathogènes produisent chaque année plus inoculum et provoquer une série d'infections qui conduisent à des épidémies à long terme.

#### **2-1-4-Ecologie de l'agent pathogène**

Certains agents pathogènes, tels que la plupart des champignons produisent leur inoculum sur la surface des parties aériennes de l'hôte. Les spores peuvent être dispersées avec facilité et provoquer des épidémies généralisées.

D'autres agents pathogènes, tels que les champignons et les bactéries vasculaire, mollicutes, les virus et les protozoaires, reproduire à l'intérieur de la plante. Dans ce cas, la propagation de l'agent pathogène est rare ou impossible sans l'aide de vecteurs, ces agents pathogènes peuvent provoquer des épidémies que lorsque les vecteurs sont nombreux et actif.

#### **2-2-Dispersion de l'inoculum**

Pour que la maladie se déclare, l'agent pathogène doit être présent avec un « potentiel d'inoculum » suffisant. Lors d'épidémies de maladies des plantes, l'origine de cet inoculum, sa multiplication et sa dissémination sont des facteurs importants. Une fois qu'une plante a été infectée, il est crucial de savoir dans quelle mesure elle fournit un inoculum suffisant pour infecter d'autres plantes hôtes, en particulier dans le cas d'agents pathogènes polycycliques.

##### **2-2-1-Transmission par la semence**

Dans certaines maladies, les semences infectées constituent une source importante d'inoculum, en particulier lorsque l'agent pathogène est polycyclique.

Des épidémies peuvent survenir à la suite de la plantation de semences infectées, même si l'incidence de l'infection est faible. Par exemple, de graves épidémies de la maladie de la nervation noire des crucifères provoquées par *Xanthomonas campestris pv. campestris* pourrait provenir de trois graines infectées sur 10 000 en raison de sa courte période de latence et de sa multiplication rapide.

Par exemple, une épidémie d'*Ascochyta* du pois chiche dans de nombreux foyers de l'État de l'Idaho aux États-Unis a été attribuée à la plantation de semences infectées. La période de latence de ce champignon étant de 5,5 jours et la production de spores est abondante, de tels foyers peuvent rapidement conduire à une augmentation de la maladie.

Environ 18 pour cent des virus végétaux sont transmis par les semences.

### **2-2-2-Transmission par le Pollen**

Selon, Mink (1993) 19 virus sont transmis par le pollen. La plupart sont transmises verticalement par les graines mais dont neuf étaient transmis horizontalement d'une plante à l'autre. Le pollen en tant que source d'inoculum est particulièrement dangereux là où les espèces pérennes sont concernées puisque le virus peut se transmettre non seulement verticalement jusqu'à la graine de la génération suivante, mais aussi horizontalement. Par exemple, la jaunisse du cerisier aigre (Sour Cherry Yellows) peut se propager aux arbres non infectés par cette voie.

### **2-2-3- Transmission par le matériel de propagation des plants**

Un nombre importantes de plantes cultivées se multiplient par multiplication végétative et sont sujettes à une infection progressive, Les pathogènes transportés avec les organes de multiplication végétative sont souvent placés au milieu des plantes sensibles, mais leur capacité à provoquer des épidémies dépend de l'efficacité de leur transmission ultérieure à de nouvelles plantes.

Les semences de pommes de terre peuvent contenir plusieurs virus tels que le virus X de la pomme de terre (PVX) et le virus Y de la pomme de terre (PVY), et leurs titres peuvent s'accumuler au fil des générations successives, entraînant de sévères réductions de rendement.

### **2-2-4- Transmission par le vent**

Les spores de nombreux champignons pathogènes des plantes, comme celles qui causent des rouilles, mildiou et les taches foliaires, sont libérés dans l'air et peuvent être dispersés par l'air ou des vents forts sur des distances variant de quelques centimètres à plusieurs kilomètres. Ces types de champignons sont responsables des épidémies les plus fréquentes et les plus répandues.

### **2-2-5- Transmission par l'eau**

Les agents pathogènes qui sont transmis par la pluie (l'antracnose et de la tavelure du pommier et la plupart des bactéries) sont presque chaque année responsable d'épidémies sévères mais un peu localisées dans un champ, un pays.

Transmis aussi par l'eau d'irrigation de surface, la grêle, peut infecter l'hôte à travers les blessures et à travers le mouvement des sols infestés

### **2-2-6- Transmission par les champignons et les nématodes**

Deux espèces de Chytridiomycètes, *Olpidium brassicae* et *O. bornovanus*, et trois espèces de Plasmodiophoromycètes, *Polymyxa graminis*, *P. betae* et *Spongospora subterranea*, sont des vecteurs de virus végétaux. *Polymyxa graminis* est vecteur de plusieurs virus céréaliers importants. Il s'agit notamment du virus de la mosaïque du blé transmis par le sol (SWMV), du virus de la nécrose des rayures du riz (RSNV), du virus de la mosaïque jaune de l'orge (BYMV) et du virus de la mosaïque des striée du blé (WSSMV).

Les nématodes vecteurs contribuent efficacement à la dissémination de plusieurs virus de plantes dans les parcelles. Dans le monde, on connaît 16 népovirus susceptibles de produire les symptômes du court-noue, dont les vecteurs sont des nématodes du sol de l'ordre des Némathelminthes, qui vivent parfois à de grandes profondeurs. 18 espèces vectrices ont été recensées, appartenant à 3 genres : *Longidorus*, *Paralongidorus* et *Xiphinema*

### **2-2-7- Transmission par les insectes et les acariens**

Le groupe le plus important d'agents pathogènes comprend ceux dont inoculum est porté par des vecteurs aériens (des virus, Mollicutes et bactéries). On suppose que 30 à 40 % des dommages et des pertes causées par les maladies des plantes est due aux effets directs ou indirects de la transmission des agents pathogènes par les insectes.

Les insectes peuvent transmettre divers type d'agents phytopathogènes : virus, viroïdes, bactéries, phytoplasmes, nématodes, champignons et protistes. Parmi les insectes vecteurs, les plus importants sont les hémiptères suceurs de sève, tels que les pucerons, les cicadelles et les aleurodes. Les plus importants sont les pucerons qui sont responsables de la dissémination de 70 % des phytovirus transmis par des vecteurs

Le feu bactérien des poires, pommes et autres plantes rosacées provoqué par la *Erwinia amylovora* est transmis par plus de 200 espèces appartenant à de nombreux groupes d'insectes, dont les pucerons, les cicadelles, les psylles, les coléoptères, les mouches et les fourmis.

Les bactéries fastidieuses habitant le xylème sont transmises des insectes se nourrissant de xylème, tels que les cicadelles (Cicadellidae: Cicadellinae) et les cercopes (Cercopidae) dont la bactérie *Xylella fastidiosa*.

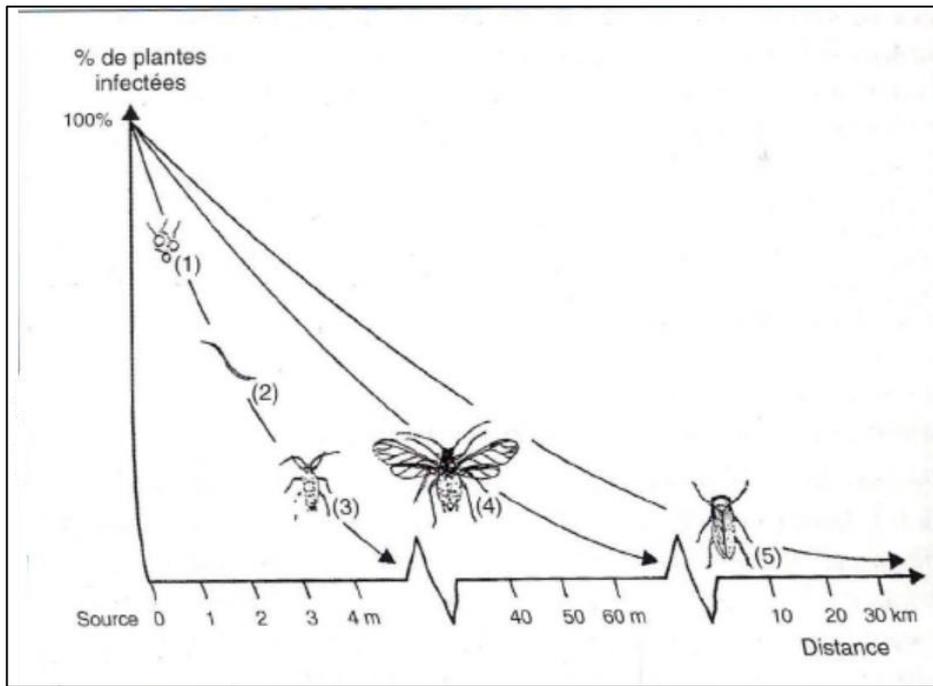


Figure 11 : Distance de dissémination des agents pathogènes par différents vecteurs. (1) zoospores ; (2) nématodes ; (3) formes aptères de pucerons ; (4) formes ailées de pucerons ;(5) cicadelles. D'après Sache, 2003

## **CHAPITRE III : LES PARAMETRES LIES AUX FACTEURS DE L'ENVIRONNEMENT**

Pour qu'une maladie se développe il lui faut un environnement propice. La température, l'humidité et l'interaction entre les deux sont souvent les facteurs les plus importants régulant la durée du cycle d'une maladie.

Les facteurs environnementaux les plus importants qui affectent le développement des épidémies de maladies des plantes sont l'humidité, la température et les activités humaines en termes de pratiques culturelles et de mesures de contrôle.

### **3-1-L'humidité**

Une humidité abondante, prolongée, ou répétée, que ce soit sous forme de pluie, rosée, ou une humidité élevée, est le facteur dominant dans le développement de la plupart des épidémies de maladies causées par les oomycètes et les champignons (mildious, taches foliaires, rouille, et l'anthracnose), les bactériennes (taches foliaires, pourritures molles), et les nématodes.

La présence de niveaux élevés d'humidité permet à tous ces événements ont lieu constamment et de manière répétée et conduit à des épidémies. En revanche, l'absence d'humidité, même pour quelques jours empêche tous ces événements de prendre place afin que les épidémies sont interrompues ou complètement arrêtées. Certaines maladies causées par des agents pathogènes transmis par le sol, tels que *Fusarium* et *Streptomyces*, sont plus graves dans sec que par temps humide, mais ces maladies se développent rarement en épidémies importantes. Les épidémies provoquées par des virus et des Mollicutes sont affectées que de manière indirecte par l'humidité, essentiellement par l'effet que l'humidité sur l'activité du vecteur. L'humidité peut augmenter l'activité de certains vecteurs,

### **3-2-Temperature**

Les épidémies sont parfois favorisées par des températures supérieures ou inférieures à l'optimum de la plante car elles diminuent le niveau de résistance partielle de la plante.

**Basse température** réduit la quantité d'inoculum de champignons oomycètes, bactéries et nématodes qui survivent en hivers froids. En outre, de basses températures de réduire le nombre de vecteurs qui survivent à l'hiver. Les basses températures qui surviennent pendant la saison de croissance peuvent réduire l'activité des vecteurs.

**Haute température** réduit l'inoculum de virus et de mollicutes qui survivent aux températures chaudes de l'été.

Cependant, l'effet le plus courant de la température sur les épidémies est son effet sur l'agent pathogène au cours des différentes étapes de la pathogénèse, c'est-à-dire la germination des spores ou l'éclosion des œufs, la pénétration de l'hôte, la croissance de l'agent pathogène ou la reproduction, l'invasion de l'hôte et la sporulation. Lorsque la température reste dans un intervalle favorable pour chacun des pour chacune de ces étapes, un pathogène polycyclique peut terminer son cycle d'infection en très peu de temps (généralement en quelques jours). Par conséquent, Les agents pathogènes polycycliques peuvent produire de nombreux cycles d'infection au sein d'une saison de croissance. Parce que la quantité d'inoculum est multiplié (peut-être 100 fois ou plus) à chaque cycle d'infection et parce que certains des nouveaux inoculum est susceptible de se propager à de nouvelles plantes, plusieurs cycles d'infection se traduisent par plus de plantes infectées par de plus en plus d'agents pathogènes, conduisant ainsi à l'élaboration d'une épidémie sévère.

Par exemple : pour la rouille des tiges du blé, en présence de conditions optimales, le cycle de la maladie peut se faire en 7 jours alors qu'en conditions normales, des nouvelles spores ne sont produites que 14 à 21 jours plus tard. Sur le terrain les conditions varient au cours du temps (en une journée et à plus long terme) par rapport aux conditions optimales et des conditions défavorables ralentissent le développement des pathogènes (ex : diminution d'Oïdium sur blé d'hiver lorsque les températures journalières augmentent). Certaines maladies semblent disparaître pendant l'été mais ne sont en fait que limitées par les fortes températures. Leur développement redémarre enfin d'été lorsque les températures diminuent.

L'humidité et la température favorables agissent ensemble dans l'initiation et le développement de la grande majorité des maladies des plantes et des épidémies de maladies des plantes. La pluie, le vent, la température et l'humidité sont les éléments des prévisions météorologiques et celles-ci sont utilisées depuis longtemps pour avertir du risque d'apparition de maladies des plantes.

Il existe d'autres éléments influençant le développement des pathogènes :

- **Le vent**, qui permet la dispersion des inocula. Il a aussi une action directe sur la température et l'humidité présentes.

- **Les radiations solaires** peuvent inhiber ou stimuler la germination de certaines spores fongiques et certaines cellules bactériennes meurent en présence de radiations solaires.

### **3-3-Le sol**

De nombreuses classes importantes d'agents pathogènes des plantes, tels que les angiospermes parasites, les nématodes et les champignons, sont transmises par le sol et leurs organes de résistance : les graines, les kystes et les spores, peuvent survivre dans le sol pendant de nombreuses années. De nombreux facteurs affectent le développement de la maladie dans les sols infestés. Ceux-ci incluent la teneur en humidité, la température et le pH. Dans certains cas, leur influence prédominante s'exerce sur l'agent pathogène, tandis que dans d'autres, elle s'exerce sur l'hôte. Un autre facteur important est la présence d'autres membres de la flore microbienne ; dont certaines espèces sont antagonistes aux agents pathogènes des plantes et qui peuvent exploiter dans le biocontrôle.

Les caractéristiques physiques et chimiques du sol ont aussi un impact sur le développement des maladies des plantes. Cet effet est plus présent sur des pathogènes transmis par le sol. L'acidité et les nutriments du sol peuvent favoriser certaines maladies au détriment d'autres.

### **3-4-Effet des pratiques culturales de l'homme et mesures de contrôle**

De nombreuses activités de l'homme ont un effet direct ou indirect sur les épidémies de maladies des plantes, certains d'entre eux favorisent ou réduisent la fréquence et le taux d'épidémies.

#### **3-4-1-Choix du site et Préparation**

Faible altitude et champs mal drainés, et spécialement près d'autres champs infectés, ont tendance à favoriser l'apparition et le développement des épidémies.

#### **3-4-2-Sélection de matériel de multiplication**

L'utilisation de semences, le matériel de pépinière, et autre matériel de multiplication qui transporte divers agents pathogènes augmente la quantité d'inoculum initial dans la culture et favorise le développement des épidémies.

L'utilisation de matériel de multiplication sains ou traités peut réduire le risque d'épidémies.

### **3-4-3-Pratiques culturales**

Monoculture continue, de grandes superficies plantées à la même variété de cultures, des niveaux élevés de la fertilisation azotée, sans labour culture, les plantations denses l'irrigation par aspersion, des blessures par application de l'herbicide, et un mauvais assainissement tout augmenter la possibilité et la gravité des épidémies.

### **3-4-4-Mesures de contrôle des maladies**

Pulvérisations de produits chimiques, les pratiques culturelles (telles que l'assainissement et la rotation des cultures), les contrôles biologiques (telles que l'utilisation de variétés résistantes), et d'autres mesures de contrôle réduisent ou éliminent la possibilité d'une épidémie. Parfois, cependant, certains contrôles, par exemple, l'utilisation d'un certain pesticides ou la plantation d'une certaine variété, peuvent conduire à la sélection de souches virulentes de l'agent pathogène qui sont soit résistant au produit chimique ou peut surmonter la résistance de la variété et donc conduire à des épidémies

### **3-4-5-Introduction de nouveaux agents pathogènes**

La facilité et la fréquence de voyage à travers le monde ont également augmenté le mouvement de graines, tubercules, de pépinière et d'autres produits agricoles. Ces événements augmentent la possibilité d'introduire des agents pathogènes dans les zones où les hôtes n'ont pas eu la chance d'évoluer une résistance à ces agents pathogènes. Ces agents pathogènes conduisent souvent à de graves épidémies. Les exemples sont Brûlure du châtaignier, la maladie hollandaise de l'orme, et le chancre des agrumes causée par la bactérie *Xanthomonas campestris pv. citri*.

## **CHAPITRE IV : LA MODELISATION DES EPIDEMIES**

L'agriculture souffre d'un problème majeur dans le monde entier, les épidémies non contrôlées mènent souvent à des pertes économiques énormes à cause de l'incapacité d'effectuer le traitement chimique au moment opportun. Ainsi, beaucoup de travaux de recherche en épidémiologie des plantes ont focalisé sur l'étude de la possibilité de prédire l'occurrence d'une maladie végétale.

Des efforts supplémentaires et des techniques spéciales pour améliorer la production alimentaire. L'utilisation de différentes technologies en faveur de l'agriculture est l'un de ces efforts. Aujourd'hui, les technologies de l'information sont fortement exercées dans ce domaine notamment la navigation par satellite, les réseaux de capteurs et les grilles de calcul. Elles ont donné un nouveau souffle à la recherche dans le secteur agricole en permettant la résolution de plusieurs problèmes dont souffrent quotidiennement les agriculteurs (changement climatique, utilisation inexpérimentée des pesticides, difficultés de contrôler les épidémies fongiques, ...).

Par conséquent, des outils de prévision des maladies végétales se voient indispensables car ils vont permettre aux cultivateurs de surveiller leurs récoltes, réduire le taux d'utilisation des produits phytosanitaires et améliorer les rendements et la qualité de leurs cultures.

### **4-1-Bases de la modélisation**

On appellera modèle, une représentation mathématique, graphique ou informatique des objets et des relations entre, ceux-ci dans un domaine restreint du monde réel, objet d'un questionnement.

La modélisation est un moyen d'explicitier la complexité afin de mieux comprendre le fonctionnement d'un système et de prendre les décisions le concernant. Modéliser une épidémie consiste à lui donner une représentation permettant de décrire ou d'analyser son développement.

#### **4-1-1-Etapes de la modélisation**

La modélisation est un outil utile pour la compréhension des épidémies de maladies sur plantes cultivées. Elle constitue une étape essentielle avant d'établir la stratégie de contrôle d'une maladie.

- **La construction d'un modèle** se base sur une analyse détaillée de la situation à représenter, incluant à la fois l'utilisation prudente des sources bibliographiques et la réalisation d'expérimentations spécifiques.
- **La vérification du modèle** se base sur une revue technique des relations incluses dans le modèle, de son fonctionnement général et de sa cohérence interne.
- **La validation du modèle** nécessite la comparaison des résultats d'expérimentations indépendantes de celles ayant servi à sa construction (résultats qualitatifs relatifs aux courbes de progressions de la maladie et tests statistiques appropriés) a réponses du modèle. Une fois validé, le modèle peut être appliqué à des situations réelles, à condition que celles-ci ne s'éloignent pas trop de celles ayant servi à sa construction et à sa validation. Hors de son domaine de définitions initiales, des expérimentations complémentaires et une nouvelle validation locale sont nécessaires.

#### **4-2-Modèles utiliser en épidémiologie végétale**

##### **4-2-1-Modèles statistiques**

Ces modèles sont basés sur l'existence de relations statistiquement significatives entre une composante du cycle épidémique et une ou plusieurs variables caractérisant l'environnement. Les données de base peuvent être issues d'expérimentations spécifiques ou de recueils historiques. Le modèle le plus simple est issu d'une régression linéaire du

$$\text{type : } y = a + b.x$$

Ou y est la composante du cycle épidémique à prédire et

x la variable environnementale prédictive.

L'adéquation du modèle est donnée par le coefficient de détermination (R<sup>2</sup>), qui indique la proportion de la variabilité des données expliquée par le modèle.

Ces modèles sont néanmoins très utilisés pour réaliser des avertissements agricoles à l'échelle régionale et à brève échéance. La prévision du déclenchement éventuel d'une épidémie (ou du franchissement d'un seuil de nuisibilité) est alors réalisée à partir des conditions climatiques relevées dans les jours précédant la simulation ou prévues pour les jours à venir. Ces modèles permettent souvent de définir un indice d'infection et d'en calculer les accumulations fractionnées journalières, l'infection étant prévisible lorsque l'indice atteint une valeur critique. Fig.11et12.

#### **4-2-2-Modèles mécanistes**

Ce type de modèle se base sur la connaissance des mécanismes impliqués et essaie de les transcrire à l'aide d'équations dont les paramètres ont une signification biologique intrinsèques travaux pionniers de Van der Plank illustrent cette approche. Dans ce cas, la progression de la sévérité de la maladie (x) au cours du temps (t) est d'abord considérée comme illimitée, donc de type exponentiel, se traduisant par l'équation différentielle :

$$dx / dt = r.x$$

dx / dt: taux instantané d'accroissement de maladie

x: proportion de maladie (proportion de tissus malades)

En situation réelle, la progression de l'épidémie est rapidement limitée par la disponibilité des tissus hôtes, ce qui nécessite l'introduction d'une correction (1 - x) décrivant la diminution progressive de la quantité de tissus hôtes disponibles :

$$d/ dt = r.x. (1 - x)$$

#### **4-2-3-Modèle prédictif**

Un modèle de type prédictif vise à prévoir le déroulement de l'épidémie dans une situation agronomique donnée, et éventuellement à évaluer les pertes finales de rendement imputable à la maladie.

Les compartiments d'un tel modèle correspondent aux différents états du pathosystème (tissus sains, tissus hébergeant des infections latentes, tissus infectieux et tissus morts). Le passage d'un compartiment à l'autre est décrit par des fonctions de transfert dont l'expression mathématique dépend des relations entre les processus biologiques impliqués et des variables extérieures (environnementales par exemple). Les fonctions de transfert sont la plupart du temps des relations de type statistique.

#### **4-3-Simulation informatique des épidémies**

La disponibilité des ordinateurs a permis aux phytopathologistes d'écrire des programmes qui permettent la simulation des épidémies de maladies des plantes les plus importantes.

Dans une simulation par ordinateur d'une épidémie, l'ordinateur décrit les diverses sous-composantes des données de l'épidémie et de contrôle à des points spécifiques dans le temps (comme à des intervalles hebdomadaires).

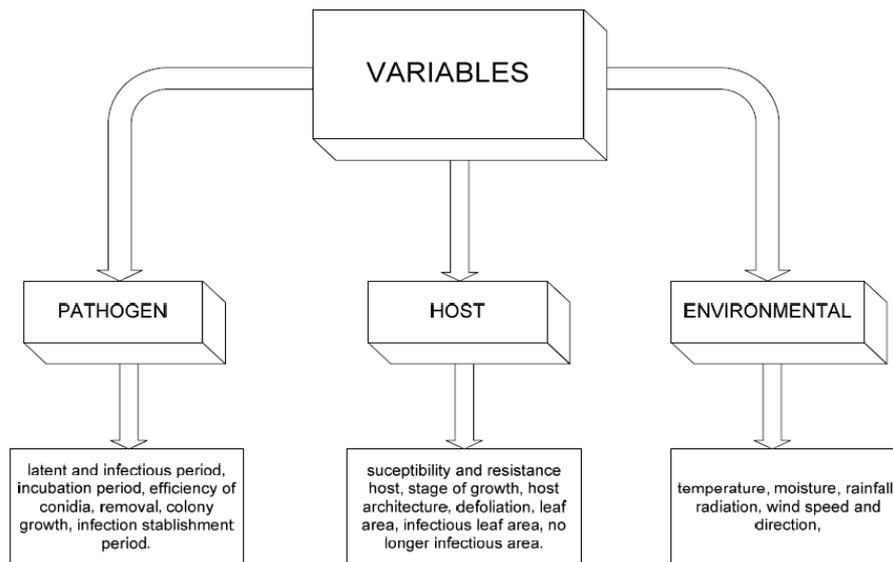


Figure 12 : Classification des variables pathogène, hôte et environnement

L'ordinateur fournit alors une information continue en ce qui concerne non seulement la propagation et la gravité de la maladie au fil du temps, mais aussi la récolte finale et pertes économiques susceptibles d'être causés par la maladie dont les conditions de l'épidémie ont été données à l'ordinateur. L'ordinateur évalue non seulement l'état actuel de la maladie, mais aussi de l'efficacité des mesures de gestion appliquées dans le contrôle de l'épidémie.

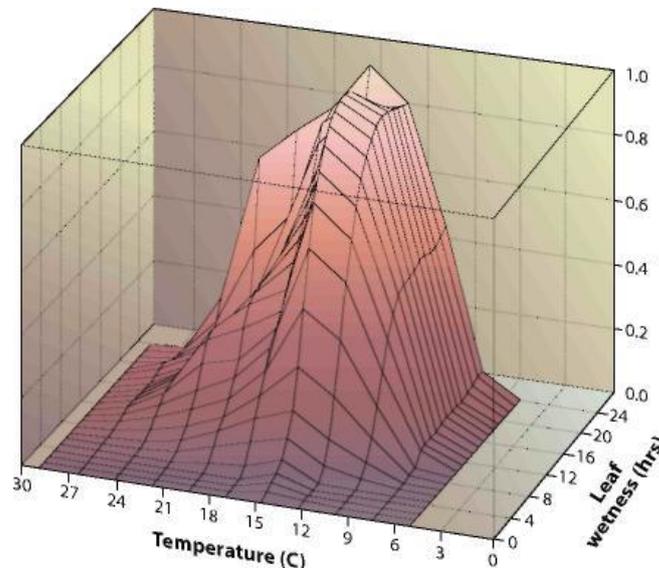


Figure 13: Model describing the effect of temperature and leaf wetness duration on the ability of the bean rust fungus *Uromyces appendiculatus* to cause disease. The maximum disease reached at 15°C and 24 hours of leaf wetness is given the maximum value of 1.0.

[From Berger *et al.* (1995).

Les simulations informatiques des épidémies sont, cependant, encore plus utile dans des situations réelles de la maladie. Là, ils servent d'outils permettant d'évaluer l'importance de la taille de chaque sous-composante de l'épidémie à un point donné dans le temps de l'épidémie en projetant son effet sur la perte de récolte finale. En mettant en évidence les sous-composants d'une épidémie qui sont les plus importants à un moment donné, la simulation sert à diriger l'attention sur les mesures de gestion qui sont efficaces contre ces sous-épidémies particuliers. Dans les évaluations ultérieures de l'épidémie, l'ordinateur évalue non seulement l'état actuel de la maladie, mais aussi de l'efficacité des mesures de gestion appliquées dans le contrôle de l'épidémie.

L'un des premiers programmes de simulation par ordinateur, appelé EPIDEM, a été écrit en 1969 et a donné de la modélisation de chaque étape du cycle de vie d'un agent pathogène comme une fonction de l'environnement. EPIDEM a été conçu pour simuler des épidémies de brûlure précoce de la tomate et la pomme de terre causé par le champignon *Alternaria solani*. Par la suite, les simulateurs informatiques ont été écrits pour cercosporiose de céleri (CERCOS), pour *Mycosphaerella* brûlure de chrysanthèmes (mycos), pour brûlure de la feuille de maïs sud causée par *Cochliobolus* (*Helminthosporium*) *maydis* (PEV maïs), et pour la tavelure du pommier causé par *Venturia* (PEV VEN). Un simulateur de maladies des plantes plus générale et plus souple, appelé ÉPIDÉMIE, a été écrit principalement pour la rouille jaune du blé, mais pourrait être modifié facilement pour d'autres systèmes hôte-pathogène. Les programmes de simulation informatiques sont maintenant disponibles pour de nombreuses maladies des plantes Fig.14 ,15 ,16 et 17.

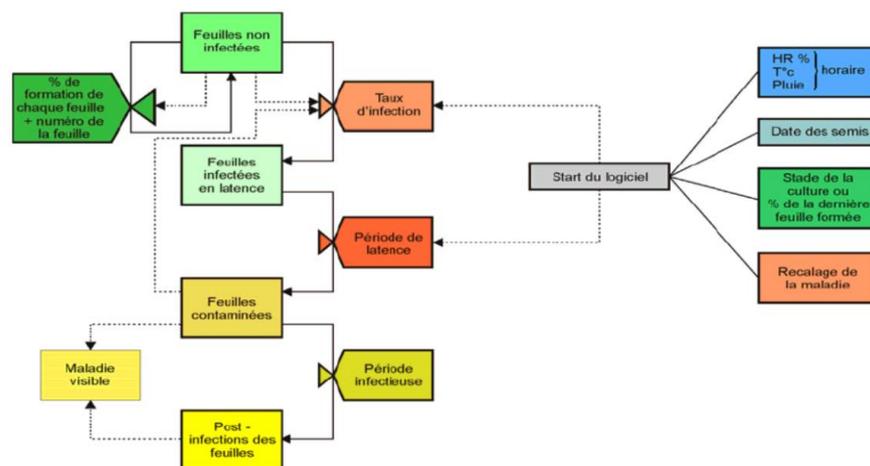


Figure 14 : Principales étapes d'ajustement de Proculture via le Web. Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver (D'après Eljarroudi, 2005)

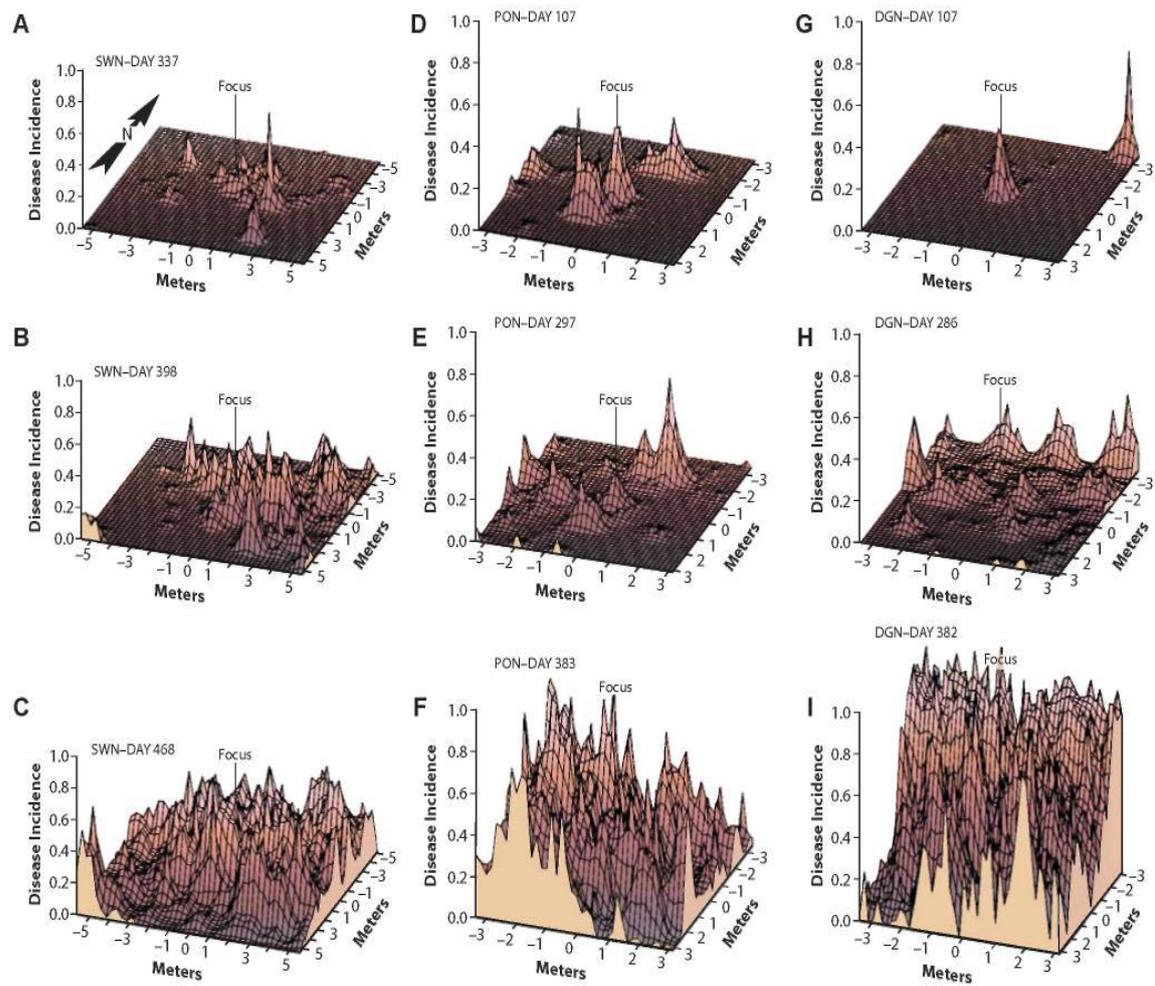


Figure 15: Development and spread of citrus canker disease, caused by the bacterium *Xanthomonas campestris* pv. *citri*, from a single inoculated plant (focus) in three citrus nurseries on the indicated days after inoculation. SWN, Swingle rootstock nursery; PON, Pinalo orange nursery; DGN, Duncan grapefruit nursery. Citrus canker developed fastest in the Duncan nursery and slowest in the Swingle nursery. [From Gottwald *et al.* (1989).

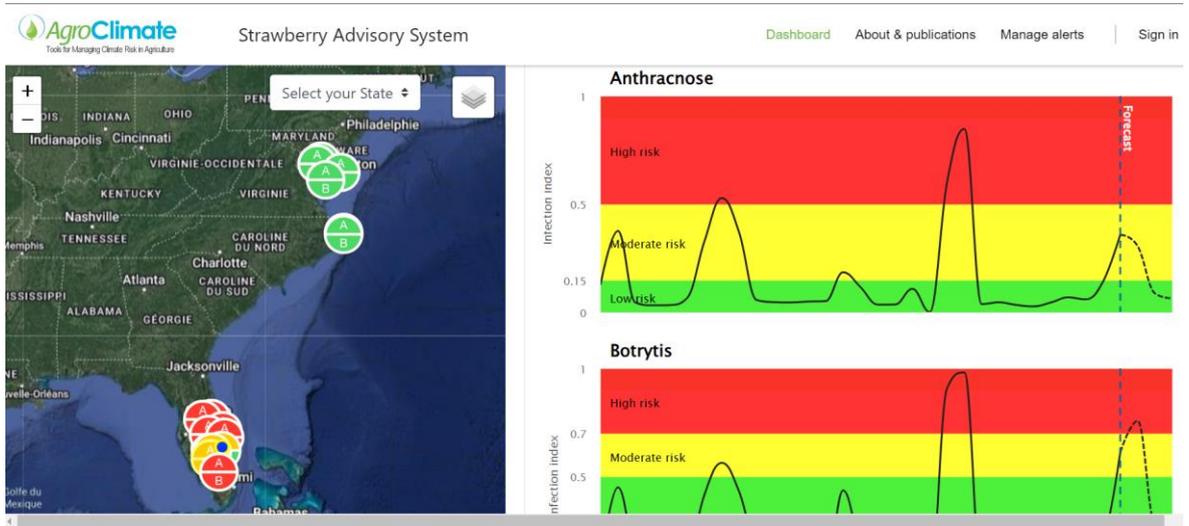


Figure 16. L'évolution du facteur d'infection des fraises par l'antracnose avec le temps dans les régions de Floride aux Etats Unis, figure reproduite à partir de [AgroClimate].

<http://agroclimate.org/>

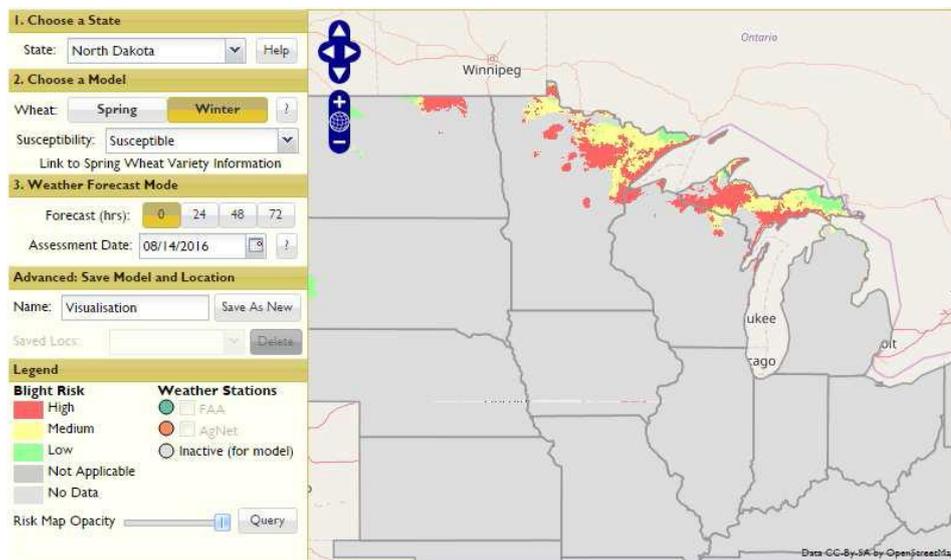


Figure 17 : Répartition des risques de la fusariose du blé sur les régions de Dakota du nord aux États Unis, figure reproduire à partir de [FHBPC 04].

## CHAPITRE V : LA REDUCTION DES EPIDEMIES

Pour diminuer les dégâts causés par la maladie, on peut agir sur trois paramètres de l'équation du modèle logistique : mécanistes

$X_0$  : inoculum primaire

T : temps ou

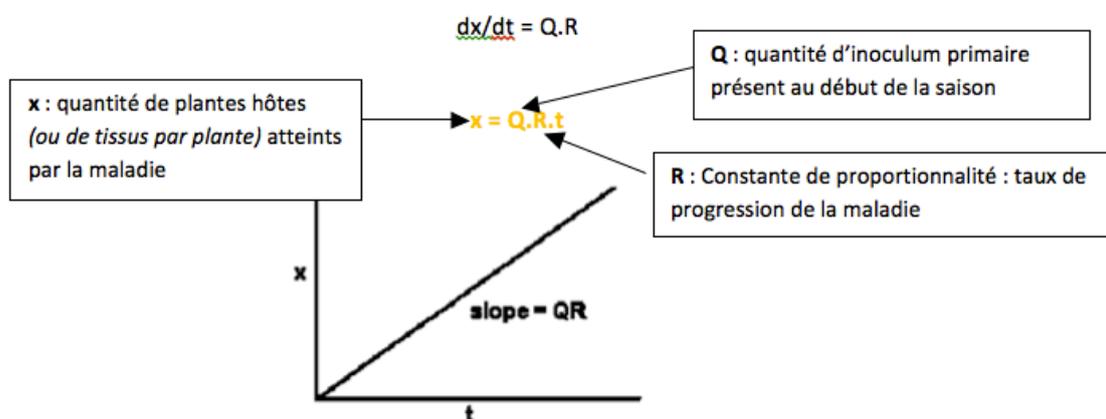
r : accroissent de la maladie

### 5.1. Réduction de l'inoculum $X_0$

- Cas des maladies monocycliques

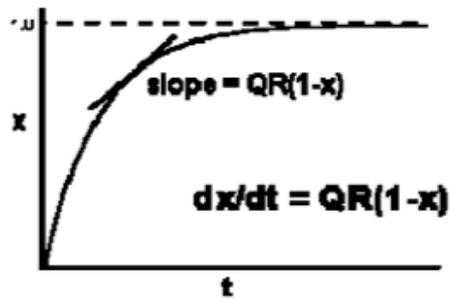
La production d'inoculum primaire pour des maladies monocycliques doit être étudiée sur plusieurs années puisqu'il n'y a qu'une reproduction par an. On choisit donc un pas de temps T correspondant à une année.

Elle peut être modélisée comme suit :



La maladie ne peut s'étendre à l'infini, la quantité totale de tissus potentiellement infectés n'est pas illimitée. On introduit un facteur correctif  $(1-x)$  qui représente les tissus sains restant.

### Monocyclic



Dans les maladies monocycliques, la quantité d'inoculum n'augmente pas de manière significative au cours de la saison. Par conséquent, dans de telles maladies, le taux d'augmentation de la maladie n'est affecté que par la capacité inhérente de l'agent pathogène à induire la maladie et par la capacité des facteurs environnementaux et des pratiques culturelles à influencer la résistance de l'hôte et la virulence de l'agent pathogène.

- **Cas des maladies polycycliques**

La production d'inoculum primaire est traduite par un pas de temps plus court comme le jour ou le mois. Ces maladies présentent plusieurs cycles de reproduction dans une même saison.

Elle peut être modélisée comme suit :

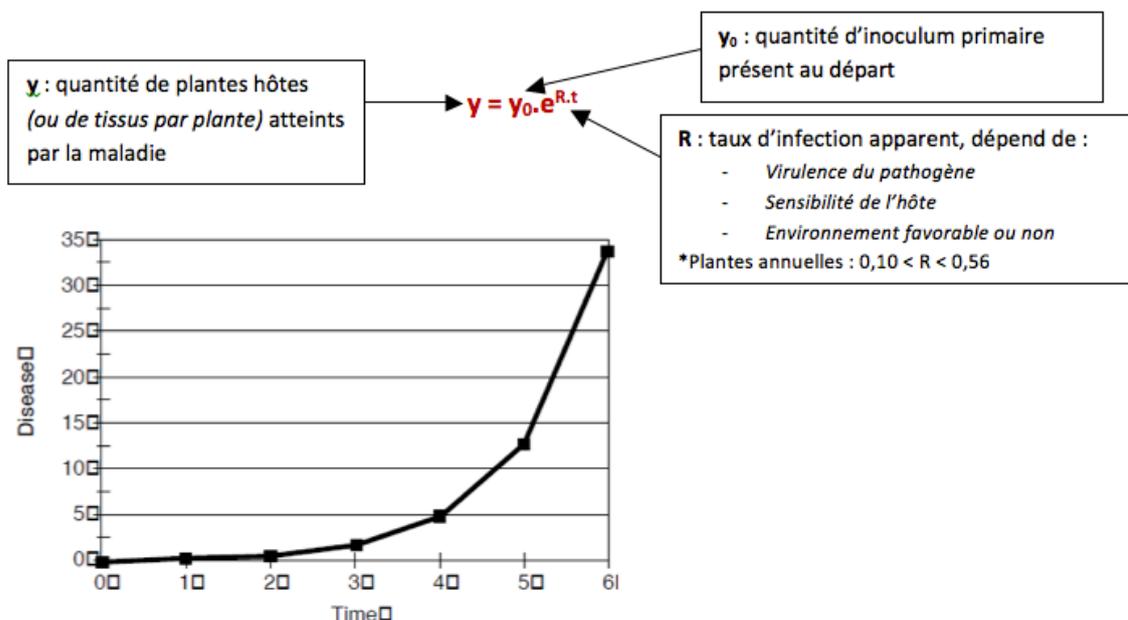


FIGURE 30.5 Exponential model of disease development over time.

L'inoculum initial pour les maladies causées par des agents pathogènes polycycliques, est relativement moins d'importance que le nombre de cycles d'infection dans l'évolution finale de la maladie. Les agents pathogènes qui connaissent de nombreux cycles d'infection ont également de nombreuses opportunités d'interagir avec l'hôte. La capacité intrinsèque de l'agent pathogène à induire une maladie, les facteurs environnementaux, la résistance de l'hôte et les pratiques culturelles, ont la possibilité d'influencer la dispersion, la pénétration, la multiplication, la taille de la lésion, le taux de formation des lésions, ainsi que le taux et l'ampleur de la sporulation, mais ils peuvent le faire non pas une mais plusieurs fois au cours de la même saison de croissance.

### **5-2-Réduction du taux d'accroissement $r$**

Le taux d'accroissement ( $r$ ) des maladies polycycliques est généralement calculé par jour ou par semaine plutôt que par an, comme il est calculé pour les maladies monocycliques. En général, le taux d'accroissement ( $r$ ) des maladies polycycliques est bien supérieur au taux d'accroissement ( $r$ ) des maladies monocycliques.

Par exemple, le  $r$  pour le flétrissement verticillien du coton est de 0,02 unités par jour et de 1,60 unités par an pour la maladie de la pourriture des racines du coton *Phymatotrichum* du coton (*Phymatotrichum omnivorum*).

En revanche, le taux d'accroissement  $r$  pour le mildiou de la pomme de terre est de 0,3 à 0,5 unité par jour, de 0,3 à 0,6 unité par jour pour la rouille de la tige du blé et de 0,15 unité par jour pour le virus de la mosaïque du concombre.

- **Maladies monocycliques :  $x_0$  fort +  $r$  faible**

Plus la quantité d'inoculum primaire  $x_0$  est forte, plus les dégâts vont être importants au moment de la récolte.

A ce niveau, il est possible d'agir pour diminuer  $x_0$ , de différentes façons : rotation des cultures, choix de plantes à résistance monogénique, stérilisation du matériel, application de fongicides...

La stratégie de contrôle des maladies monocycliques doit être basée sur la réduction d' $y_0$ .

- **Maladies polycycliques :  $x_0$  faible +  $r$  fort**

En effet, ces maladies présentent un développement très rapide et donc une plus forte influence du taux d'accroissement  $r$ . La stratégie de contrôle des maladies polycycliques doit être axée sur la diminution de  $r$ .

Plus  $r$  est fort, plus la maladie ne compromet des dégâts sur la plante hôte. Pour réduire les dégâts de la maladie en fonction du taux  $r$ , il est possible de mettre en place des mesures de contrôle, des méthodes culturales particulières (irrigation au goutte à goutte, éclaircissage des arbres fruitiers...), choix de plantes à résistance multigénique, utilisation de fongicides inhibiteurs de la biosynthèse de stérols...

### **5-3-Action sur $t$**

On peut également agir au niveau du temps, en avançant par exemple la récolte à afin de limiter les dégâts sur la culture. Plus généralement, des pratiques de contrôle et des adaptations de périodes de culture et de récolte permettent de limiter les dégâts de la maladie en jouant sur la variable  $t$ .

- **Cas des maladies polyétiques**

Les agents pathogènes provoquant des épidémies polyétiques sont présents pendant un an ou plus dans la plante infectée avant de produire un inoculum efficace, par exemple certains flétrissements fongiques, maladies virales et les maladies provoquées par les mollicutes des arbres. En raison de la nature pérenne de leurs hôtes, les maladies polyétiques se comportent essentiellement comme des maladies polycycliques avec un  $r$  plus faible. Cela est dû au fait qu'il y a autant d'arbres malades et presque autant d'inoculum au début d'une année qu'à la fin de la précédente, et que les deux augmentent au fil des années, provoquant des épidémies plus lentes mais tout aussi graves.

Certaines épidémies polyétiques comme la brûlure du châtaignier ( $r = 0,3$  à  $1,2$  unités par an) et la jaunisse de l'orme (phytoplasma) ( $0,6$  unité par an).

## CHAPITRE VI : LES AVERTISSEMENTS PHYTOSANITAIRES

### 6-1-La prévision d'apparition des symptômes

Un des aspects les plus importants des études épidémiologiques se rapporte aux avertissements agricoles, qui visent à rationaliser les décisions de traitements phytosanitaires afin :

- de réduire la charge en pesticides appliqués sur une culture,
- d'augmenter l'efficacité des traitements et
- de diminuer ainsi le coût global de la lutte chimique.

Certains systèmes d'avertissements fondent des avis de traitements sur l'observation de la phénologie de la plante-hôte, indépendamment du parasite ou des conditions spécifiques du climat.

#### Exemple :

- Dans le cas de *Botrytis cinerea* sur fraisier, on conseille quatre applications préventives de fongicides :
  - ✓ un premier traitement au début de la floraison,
  - ✓ un second lorsque 50 % des fleurs sont ouvertes,
  - ✓ un troisième lorsque 70 à 90 % des fleurs sont ouvertes et
  - ✓ un dernier traitement en fin de floraison

La plupart des systèmes d'avertissement prévoient le début de formation des lésions infectieuses sur base d'observations portant sur le niveau de l'inoculum ou des vecteurs, ainsi que sur les paramètres favorables à l'infection (température, pluviométrie ...).

De tels avertissements, fondés sur les conditions climatiques effectivement rencontrées, permettent de prévoir les risques que représentent les tissus malades une fois devenus infectieux à leur tour, après la période de latence.

### 6-2-Avertissements basés sur l'évaluation du taux d'accroissement d'une maladie épidémique

La plupart des systèmes d'avertissement relatifs au mildiou de la pomme de terre se basent sur **les conditions climatiques** pour prédire l'accroissement de la maladie **supposant implicitement que l'inoculum *Xo* est présent systématiquement** dès le début de la période de culture.

Ces modèles calculent ensuite la **durée d'incubation**, ce qui permet **d'estimer la prochaine sporulation** susceptible de contaminer.

- **Le système de HYRE**

Se fonde sur l'analyse de la température et de la pluviométrie. Une journée est considérée comme favorable au mildiou si la température moyenne des 5 jours qui précèdent est inférieure à 25 ° C et la pluviométrie des dix derniers jours supérieure à trois cm. Le traitement préventif est à appliquer sept à dix jours après une période comportant dix jours favorables consécutifs.

- **Le système de WALLIN**

Évalue les risques journaliers d'infection en prenant en compte

Les **températures moyennes et la durée des périodes où l'HR est supérieure à 90 %**, que l'on transforme en coefficient de sévérité compris entre zéro et quatre unités.

L'apparition du mildiou au champ est prévue 10-14 jours après que la somme des coefficients de sévérité, cumulés depuis l'émergence des plantes, ait atteint une valeur comprise entre 18 et 20 unités.

- **Le système de WALLIN**

Évalue les risques journaliers d'infection en prenant en compte

- les températures moyennes et la durée des périodes où l'HR est supérieure à 90 %, que l'on transforme en coefficient de sévérité compris entre zéro et quatre unités.

- Le système **Blitecast**

Repose sur deux hypothèses de travail :

1. l'inoculum initial n'étant pas connu, on postule que l'épidémie débute à partir d'un inoculum très faible. On considère à cet égard qu'une seule lésion sur 10.000 plantes est suffisante, ce qui correspond à  $x_0 = 0,0001$  ;

2. on suppose que l'épidémie se développe selon le modèle de Van der Plank. La transformation logarithmique permet dès lors d'obtenir des droites de régression du % d'infection par rapport au temps, dont la pente est fonction de la résistance des cultivars.

Les données climatiques sont collectées dès que les lignes de pommes de terre sont visibles .les recommandations de traitements sont faites lorsque

$x = 0,001$  (surface infectée est de 0,1 %), valeur qui est atteinte en moyenne quand la somme des coefficients de sévérité est comprise entre **16 et 22 unités**, selon les variétés.

Les recommandations de traitements sont fournies de semaine en semaine sur base de la pluviométrie et en fonction de la somme des coefficients de sévérité relatifs aux sept jours qui précèdent.

Pour les périodes qui comptent moins de cinq jours favorables au mildiou, il est conseillé de ne pas traiter, sauf si la somme des coefficients de sévérité atteint cinq.

Pour les périodes pluvieuses, les applications sont intensifiées lorsque  $x = 0,01$  (surface infectée égale à 1 %). le système d'avertissement est abandonné car le danger devient permanent et l'agriculteur est invité à intervenir selon un calendrier régulier.

Recommandations de protection chimique contre le mildiou de la pomme de terre sur base des valeurs des coefficients de sévérité *Blitecast*.

Pluviométrie	Somme hebdomadaire des coefficients de sévérité				
	0-2	3	4	5-5	7 ou plus
Faible ( $0 < Jf/s < 5$ )	Pas de traitement	Pas de traitement	Alerte	Traitement modéré	Traitement intensif
Forte ( $Jf/s > \text{ou} = 5$ )	Pas de traitement	Alerte	Traitement modéré	Traitement intensif	Traitement intensif

Figure 18 : Recommandations de traitements chimiques contre le mildiou de la Pomme de terre (D'après Lepoivre, 2003).

Le bénéfice de l'utilisation du système blitecast, comparativement à un calendrier d'applications régulières de fongicides, dépend de l'environnement auquel les plantes sont soumises.

Dans les microclimats favorables au mildiou, l'utilisation du système blitecast conduit à un nombre moyen d'applications de fongicides supérieur au nombre d'applications réalisées automatiquement tous les sept jours,

Dans le cas d'un microclimat moins favorable au mildiou, blitecast conduit à un nombre de traitements inférieur à ceux réalisés selon une fréquence hebdomadaire.

La diversité des situations individuelles des champs de production fait que l'application de *blitecast* est bénéfique pour certains producteurs et inefficace pour d'autres.

- D'autres systèmes d'avertissements informatisés ont été développés.

Au Pays-Bas, le modèle EPIPRE (EPidemies, PREdiction and PREvention) a été mis au point pour définir les modalités de traitements fongicides contre *Puccinia striiformis* sur céréale.

Les informations qui alimentent le programme comprennent :

- des estimations d'intensité de la maladie,
- le stade phénologique de la culture,
- la fertilisation en azote.
- la date de semis,
- certaines caractéristiques pédologiques du substrat
- les applications d'herbicides ou
- de régulateurs de croissance.

### **6-3-Avertissements basés sur la mesure de l'inoculum**

Certains systèmes de prédiction des épidémies se basent sur la mesure de l'inoculum initial  $X_0$  ou à défaut sur la quantité de maladies  $y$  présente à un moment donné ou à un stade déterminé de la maturité de la plante.

Ce type d'avertissement s'adresse surtout aux maladies monocycliques, chez lesquelles l'impact de l'inoculum initial  $X_0$  est le plus marqué sur le développement ultérieur de l'épidémie.

Lorsque l'accroissement de l'intensité de la maladie ( $r$ ) est corrélé avec le niveau atteint par l'inoculum, l'avertissement peut s'appuyer sur une estimation directe ou indirecte de ce seul inoculum.

Toutefois, dans le cas d'épidémies explosives, le taux d'accroissement de la maladie ( $r$ ) constitue le facteur essentiel à considérer pour la prédiction du développement ultérieur de la maladie.

Ces deux approches ne sont pas exclusives l'une de l'autre, les systèmes d'avertissement pouvant combiner l'évaluation de l'inoculum initial  $x_0$  et l'estimation du taux d'accroissement de la maladie  $r$ .

Dans d'autres cas tels :

- **Présence de vecteurs**, le survie des vecteurs peut servir de base d'estimation indirecte de l'inoculum initial.

Par exemple,

Aux Etats-Unis, dans le cas du flétrissement du maïs dû à *Pantoea stewartii*, la prévision de la maladie se fonde sur l'estimation du potentiel de survie du vecteur *Chaetocnema pulicoria*.

- Pendant les hivers doux, un grand nombre d'insectes vecteurs survivent et disséminent la bactérie au cours de la saison suivante,
- tandis que lors d'hivers froids, la population de vecteurs est réduite, ce qui limite le développement de la bactériose.

Un système analogue dans son principe permet de prédire l'incidence des jaunisses virales de la betterave BYV (acronyme de Beet yellows virus).

En Grande-Bretagne, sur base de paramètres qui expriment le potentiel de survie et de développement des pucerons vecteurs, en fonction

- du nombre de jours de gel entre janvier et mars et
- de la température moyenne en avril.

- **Dans le cas d'agents pathogènes transmis par le sol**, la quantification de l'inoculum peut être réalisée par des plantes indicatrices croissant sur le substrat infecté, dans des conditions propices au développement des symptômes de la maladie.

#### **6-4-Systèmes de prévision des maladies agricoles**

C'est un outil de gestion utilisé pour prédire la survenue ou l'aggravation des maladies chez les plantes cultivées. A l'échelle d'une parcelle, ces systèmes sont utilisés par les producteurs pour prendre des décisions économiques sur les traitements destinés à lutter contre la maladie.

Selon cette définition, la mission principale d'un système de prévision des maladies végétales consiste à détecter la survenue des maladies suffisamment à l'avance pour permettre aux cultivateurs de prendre les bonnes décisions sur l'application des produits phytosanitaires.

Les systèmes de prévision des maladies de plantes sont conçus pour répondre à certains objectifs, à savoir :

- Faciliter le contrôle des épidémies.
- Réduire les pertes économiques entraînées par la propagation des parasites.
- Aider les agriculteurs dans la prise de décision concernant l'application des pesticides,
- Améliorer la qualité de la récolte,
- Réduire les coûts de production en appliquant les produits chimiques uniquement lorsque c'est nécessaire.

Aucun système de prévision des maladies de plantes ne fonctionne bien pour tous les problèmes. En effet, un modèle étant une estimation de la réalité, il repose sur un certain nombre de suppositions de départ pour exister. Ces suppositions sont fortement dépendantes du contexte et elles diffèrent pour chaque problème. Par conséquent, la construction d'un modèle efficace requiert une étude comparative basée sur les hypothèses de la problématique et les tests de performances de chaque algorithme.

#### **6-4-1-Etapes de prévision des maladies agricoles**

Le processus de prévision des maladies agricoles est composé de quatre étapes essentielles : la collecte de données, leur nettoyage et unification, leur traitement et analyse pour l'évaluation du risque de la maladie. Enfin, la présentation des résultats à l'utilisateur final qui sera averti en cas de détection d'une maladie.



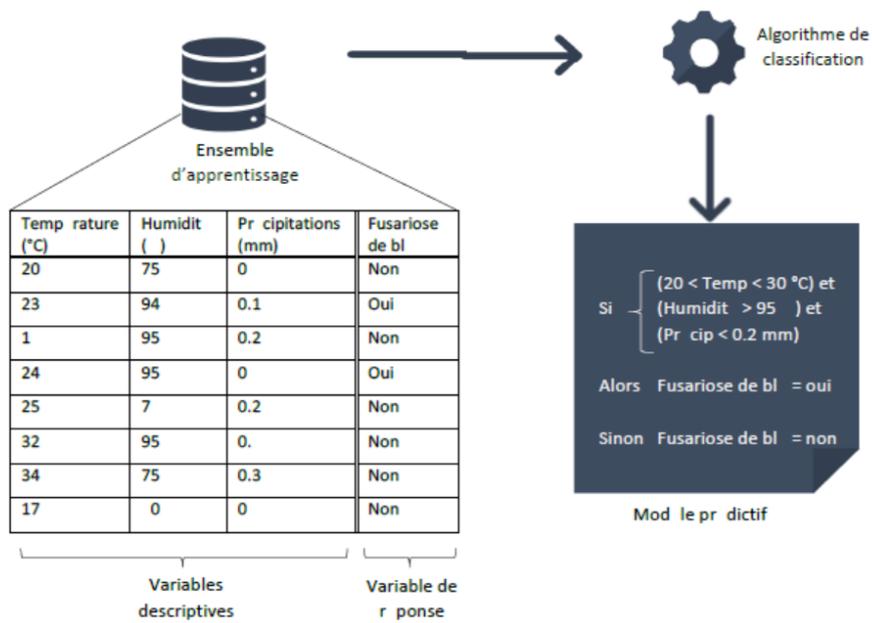


Figure 19 : Exemple de construction d'un modèle prédictif pour la fusariose du blé, à l'aide d'un algorithme de classification.

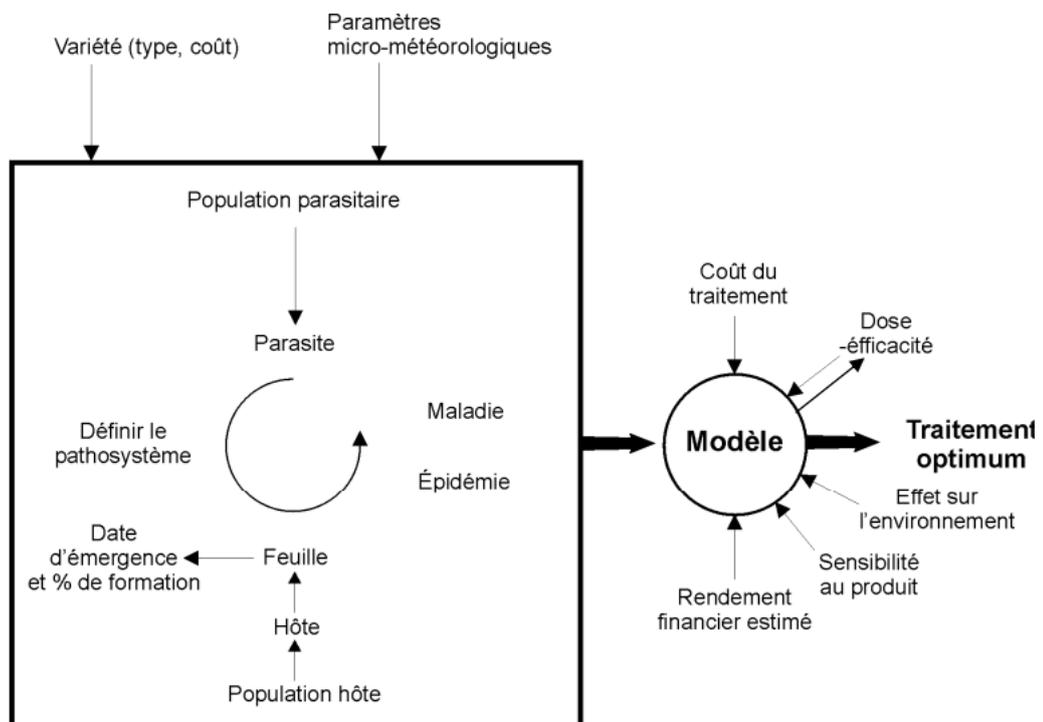


Figure 20 : Schéma montrant l'objectif principal du modèle d'avertissement (D'après Eldjarodie, 2005)

#### 6-4-2-Exemples de systèmes de prévision des maladies agricoles

Le tableau suivant, nous exposons quelques systèmes de prévisions qui sont fonctionnels dans certains pays dans monde.

Tableau. Exemples de systèmes de prévision des maladies végétales

Projet	Pays	Année	Plante	Maladie	Méthode de collecte des données
Plateforme web pour la prévision des maladies des plantes	Corée du sud	2009	Le riz et la poire	La pyriculariose, la brûlure pellicularienne, la pourriture de la graine et la rouille	Stations météorologiques
AgroClimate	États Unis	2005	La fraise et la myrtille	La pourriture noble et l'anthraxose	Stations météorologiques
China-blight	Chine	2008	Pomme de terre	Le mildiou	Stations météorologiques
Outil d'évaluation du risque de la fusariose	États Unis	2004	Blé	La fusariose	Stations météorologiques
Agrisense	Inde	2009	La vigne	Le mildiou	RCSF

##### 1-Plateforme web pour la prévision des maladies des plantes en Corée du sud

Ce système était développé en 2009 dans la Corée du sud, il assiste les cultivateurs de Gyeonggido dans le contrôle de plusieurs maladies des plantes à savoir la pyriculariose, la brûlure pellicularienne et la pourriture de la graine du riz ainsi que la rouille du poirier.

Il prend en considération les différents facteurs d'évaluation du risque de chaque maladie tels que la moyenne de la température de la journée, les précipitations et la direction du vent sont calculés périodiquement en se basant sur des données climatiques fournies en temps réel par 26 stations météorologiques.

Les informations disponibles dans le site web incluent les données météorologiques par heure et quotidiennes ainsi que les prévisions quotidiennes des maladies du riz (la pyriculariose, la brûlure foliaire de la gaine et la pourriture de la graine) et de rouille du poirier, elles sont présentées aux utilisateurs sous forme d'une carte géographique et des formes graphiques. Le système fournit aussi des recommandations sur le contrôle de plusieurs maladies des plantes, en spécifiant le type et la quantité des produits chimiques à appliquer.

<http://www.epilove.com/>

## **2- AgroClimate**

AgroClimate 4 est une plateforme web pour le soutien à la décision agricole, sa première version était développée en 2005 aux Etats Unis. Parmi les fonctionnalités qu'elle offre, on trouve la prévision des maladies de la pourriture noble et l'anthracnose de la fraise et de la myrtille dans la région de Floride, Etats unis. Plusieurs stations météorologiques à travers l'état fournissent périodiquement les données climatiques (actuelles et prévisibles pour 72 heures à venir) nécessaires à l'évaluation du risque de chaque maladie [Fraisie 06].

L'utilisateur peut sélectionner la station météorologique la plus proche a la région ou il souhaite évaluer le risque, il a même la possibilité de s'inscrire afin de recevoir une alerte par SMS ou par e-mail en cas de détection d'un risque de la maladie. Les résultats de la prévision sont présents sous forme de graphiques qui montrent les niveaux du risque des maladies pendant un mois (moyen, fort).

Le système permet aussi à l'agriculteur de savoir s'il doit appliquer les fongicides selon la date de leur dernière pulvérisation.

<http://agroclim ate.org/>

## **3- China-blight**

Le système de prévision China-blight 5 était développée en 2008 pour surveiller les attaques du mildiou de la pomme de terre en Chine pendant la saison de croissance de la culture. Lorsque les utilisateurs (agriculteurs, les conseillers agricoles etc.) observent la maladie dans leurs champs ou dans leurs régions, ils peuvent envoyer un rapport a China-blight via internet ou par SMS. Les informations reçues sont présentées et mises à jour en temps réel dans une, les attaques du mildiou sont aussi localisées sous forme de points rouges sur la carte géographique régionale.

Le risque de la maladie est aussi évalué pour chaque région et présente dans un tableau indiquant si le risque est moyen ou fort. Le système permet également de calculer le risque d'apparition du mildiou dans les 2 jours à venir en utilisant les données climatiques du centre météorologique national.

<http://www.china-blight.net/>

#### **4- Outil d'évaluation du risque de la fusariose**

Ce système prédictif 6 est destiné aux cultivateurs des Etats Unis, son objectif est de les aider à évaluer le risque de la fusariose du blé dans leurs régions en utilisant les données climatiques des stations météorologiques.

Il calcule le risque de l'épidémie en se basant sur les conditions météorologiques observées.

Pour générer une prédiction du risque de la fusariose dans une région donnée, l'utilisateur commence par choisir l'état, le jour de prédiction et le type du blé (blé du printemps ou blé d'hiver), il pourra ensuite personnaliser la prédiction selon le niveau de sensibilité qui correspond au mieux aux variétés du blé dans sa ferme. Par défaut, les cartes de risque sont basées sur les observations météorologiques pendant 7 jours avant la date d'évaluation sélectionnée, l'utilisateur peut intégrer la météo prédite pour les 24, 48 ou 72 heures à venir.

<http://www.whe.atscab.psu.edu/>

#### **5- Agrisense**

Agrisense est un système prédictif du mildiou de la vigne, développée en 2009 en Inde. L'estimation du risque de la maladie est basée sur les facteurs climatiques tels que la température, l'humidité et l'humidité des feuilles. Les données météorologiques sont collectées à l'aide d'un RCSF, elles sont ensuite transférées au serveur via un réseau GPRS. Le système offre aux utilisateurs la possibilité de consulter l'état de leurs fermes en temps réel à travers une interface web.

## **7- NOUVEAUX OUTILS UTILISES EN EPIDEMIOLOGIE VEGETALE**

### **7-1-les outils moléculaires**

Le plus important d'entre eux sont le développement et l'utilisation des sondes génétiques de (ADN) qui permettent la détection définitif et l'identification d'un pathogène de plante

à l'intérieur ou sur la surface d'un tissu végétal,

en mélange avec d'autres microorganismes,

et même au voisinage de la plante hôte.

La détection et l'identification d'un agent pathogène par sa sonde génétique (Une sonde est un marqueur qu'on introduit dans un milieu biologique pour que ses propriétés vis-à-vis des constituants de ce milieu soient révélées par l'émission d'un signal détectable par des instruments de mesure.) se fait par :

- polymérase chain reaction (PCR),
- Random amplified polymorphic DNA (RAPD)

En plus, ces techniques peuvent détecter tous les nouveaux agents pathogènes mutants et/ ou une nouvelle race résistante.

La détection de ces changements dans le pathogène est d'une importance primordiale en épidémiologie, car de tels changements rendent inutile et nécessitent une révision immédiate de toutes les prédictions antérieures sur l'évolution de l'épidémie et les recommandations pour la gestion de la maladie.

### **7-2-Système d'information géographique (SIG)**

C'est un système informatique qui peut être installé sur tout ordinateur à modèle récent de bureau et est capable d'assembler, de stocker, manipuler, et afficher des données qui sont référencés par des coordonnées géographiques.

SIG est adaptable à des opérations de toute taille, et des données peuvent être utilisées à toute échelle d'un seul champ à une région agricole.

Il est utilisé pour mieux comprendre et gérer l'environnement, y compris la compréhension et la gestion des épidémies de maladies des plantes.

Techniques SIG permettent de faire des liens entre des événements basés sur la proximité géographique, ces connexions sont essentielles à la compréhension et la gestion des épidémies.

Les techniques de SIG peuvent même incorporer des systèmes de prévision de la maladie. Les données de prévisions météorologiques à haute résolution sont souvent disponibles, le développement des épidémies de maladies des plantes peut être prédit en connaissant leur dépendance sur d'autres variables météorologiques critique et de la répartition géographique de l'inoculum de l'agent pathogène est estimée dans un cadre SIG.

SIG sont souvent utilisés pour l'analyse spatiale et temporelle des développements de la maladie sur de relativement grandes zones géographiques et aide à déterminer le rôle et l'importance relative des différentes parties de ces zones dans l'initiation et le développement de l'épidémie.

### **7-3-Système de positionnement global(GPS)**

GPS permet de localiser un arbre individuel ou une zone spécifique ou une zone du champ qui est touchés par un agent pathogène, qui peut ensuite être visité et examiné à nouveau.

De même, les arbres ou les zones sélectionnées pourraient être traités avec le pesticide approprié ou autre traitement où l'agent pathogène est présent sans la nécessité de traiter la totalité du champ.

Élimination de l'agent pathogène à partir de détection précoce dans champ et le traitement est souvent efficace ce qui ne permettant pas à l'agent pathogène provoque une épidémie dans le champ.

## REFERENCES

- Agrios, G.N., 2005.** Plant pathology.3th edi. Academic press New York 529p.
- Berger, R. D., 1977.** Application of epidemiological principles to achieve plant disease control. *Annu. Rev. Phytopathol.* 15, 165–183.
- Berger, R. D., et al., 1995.** A simulation model to describe epidemics of rust of *Phaseolus* beans. I. Development of the model and sensitivity analysis. *Phytopathology* 85, 715–721 and 722–727.
- Bertschinger, L., Keller, E. R., and Gessler, C. (1995).** Development of EPIVIT, a simulation model for contact- and aphid-transmitted potato viruses. *Phytopathology* 85, 801–814 and 815–819.
- Bouhenni S. et Karouche I., 2017.** Algorithmes de classification pour la prévision des maladies agricoles. Mémoire de master. Ecole national nationale d’informatique ISI Algérie.
- Coakley, S. M., 1988.** Variation in climate and prediction of disease in plants. *Annu. Rev. Phytopathol.* 26, 163–181.
- Duhamel de Monceau, H.L., 1728.** " Explication physique d'une maladie qui fait périr plusieurs plantes dans le Gastinois, et particulièrement le safran. » *Mém.Acad. Sei. Math. Phys.*, Paris, pp. 100-112
- ED De wolf, L V Madden & P E Lipps, 2003.** *Risk assessment models forwheat fusarium head blight epidemics based on within-season weather data.*Phytopathology, vol. 93, pages 428–435.
- Gaunt, R. E.,1995.** The relationship between plant disease severity and yield. *Annu. Rev. Phytopathol.* 33, 119–144.
- Gottwald, T. R., Timmer, L. W., and McGuire, R. G. 1989.** Analysis of disease progress of citrus canker in nurseries in Argentina. *Phytopathology* 79:1276-1283.
- Eljarrodie Moussa, 2005.**Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d’hiver au Grand-Duché de

Luxembourg : calibration et validation d'un modèle de prévision. Thèse de doctorat en science Université de Liège Belgique pp.262

**Huber, L., and Gillespie, T.-J. (1992).** Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. *Annu. Rev. Phytopathol.* 30, 553–577

**J.H. Andrews and I. Tommerup, 1995** .Advances in Plant Pathology. Volume 11.In Academic press.333p.

**Johnson, K. B., 1992.** "Evaluation of a mechanistic model that describes potato crop losses caused by multiple pests." *Phytopathology* 82: 363-369.

**Kim & Eun-Woo Park, , 2010.** A web-based information system for plant disease forecast based on weather data at high spatial resolution. *The Plant Pathology Journal*, vol. 26, no. 1, pages 37–48.

**Krause, R. A., Massie, L. B., and Hyre, R. A., 1975.** BLITECAST, a computerized forecast of potato late blight. *Plant Dis. Rep.* 59, 95–98

**Leonard J Francl. 2001.** The disease triangle: a plant pathological paradigm revisited. *Plant Health Instructor DOI*, vol. 10, 2001.

**Lepoivre P., 2003.** *Phytopathologie Bases moléculaires et biologiques des pathosystèmes et fondements des stratégies de lutte.* ED. De Boeck Université.

**Nelson, M. R., et al. ,1999.** Applications of geographic information systems and geostatistics in plant disease epidemiology and management. *Plant Dis.* 83, 308–319.

**NG Shah, UB Desai, I Das, SN Merchant, SS Yadav et al., 2009.** In-field wireless sensor network(wsn) for estimating evapotranspiration and leaf wetness. *International Agricultural Engineering Journal*,vol. 18, no. 3-4, pages 43–51.

**SACHE, I., 2000.** "Short-distance dispersal of wheat rust spores by wind and rain." *Agronomie* 20: 757-767.

**Strange, Richard N., 2003.** *Introduction to plant pathology* Copyright by John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. 464p.

**Tongle Hu, Jiehua Zhu & Keqiang Cao., 2012.** *China-blight—A Web based DSS on potato late blight management in China.* Special Report No. 15, page 157,

**Rapilly, F.**, 1991. L'épidémiologie en pathologie végétale : mycoses aériennes. Paris, INRA Editions.

**Rapilly, F. & E. Jolivet**, 1976. "Construction d'un modèle (EPISEPT) permettant la simulation d'une épidémie de *Septoria nodorum* Berk. sur blé." *Revue de statistique appliquée* 24: 31-60.

**Vanderplank, J. E.**, 1963. "Plant Diseases: Epidemics and Control." Academic Press, New York.

**Wee-Soo Kang, Soon-Sung Hong, Yong-Kyu Han, Kyu-Rang Kim, Sung-Gi**, 2010. A Web-based Information System for Plant Disease Forecast Based on Weather Data at High Spatial Resolution *Plant Pathol. J.* 26(1) : 37-48

**Zadoks, J. C.**, 2001. Plant disease epidemiology in the twentieth century: A picture by means of selected controversies. *Plant Dis.* 85, 808–816.

**Zadoks, J. C., and Schein, R. D.**, 1979. "Epidemiology and Plant Disease Management." Oxford Univ. Press, London.