

Approches Modernes pour le Diagnostic et la Lutte contre les Maladies des Cultures Maraîchères dans les Conditions de Changement Climatique

Автор(и): гл. ас. д-р Катя Василева, ИЗК "Марица" - Пловдив

Дата: 25.03.2026 Брой: 3/2026



Résumé

Le changement climatique modifie considérablement la dynamique des maladies des cultures maraîchères, entraînant un développement plus rapide des agents pathogènes, une meilleure survie de l'inoculum et des épidémies plus fréquentes. L'augmentation des températures, les précipitations extrêmes et les périodes de sécheresse créent des conditions qui facilitent les

infections par des virus, des bactéries et des champignons pathogènes. Dans ces conditions, les méthodes de diagnostic traditionnelles sont souvent insuffisantes en raison de symptômes qui se chevauchent et de changements induits par le stress. Les approches modernes incluent les tests immunochromatographiques rapides, les méthodes moléculaires, le diagnostic hyperspectral, les technologies par drone et les modèles prédictifs. Une gestion efficace des maladies nécessite une approche intégrée impliquant des variétés résistantes, des biofongicides, des biostimulants et des pratiques agronomiques optimisées. La combinaison d'outils de diagnostic traditionnels et modernes, soutenue par une expertise phytopathologique, est la clé d'une production durable dans les conditions du changement climatique.

Les maladies des plantes restent l'un des défis les plus sérieux pour l'agriculture moderne, causant des pertes annuelles significatives en rendement, en qualité et en résilience des agroécosystèmes. Selon Fang et Ramasamy (2015), les pertes causées par les agents pathogènes "varient entre 20 % et 40 %" et représentent un facteur clé menaçant la sécurité alimentaire mondiale. Dans des conditions de changement climatique, de systèmes de production intensifs et de flux commerciaux mondialisés, le risque d'épidémies, l'émergence de nouvelles races et la propagation d'agents pathogènes invasifs augmentent significativement (Juroszek & von Tiedemann, 2011).

Une gestion efficace des maladies nécessite deux axes interdépendants : un diagnostic précis et opportun, et des stratégies de contrôle durables intégrant des approches biologiques, agronomiques, chimiques et numériques. Au cours des dernières décennies, le diagnostic a subi une transformation profonde – de l'évaluation visuelle et de la microscopie vers les méthodes moléculaires, les plateformes de phénotypage à haut débit, les capteurs à distance et les algorithmes d'apprentissage profond. Comme le notent Balodi et al. (2017), "la science du diagnostic des maladies a évolué de l'inspection visuelle vers des techniques sérologiques et moléculaires hautement sensibles", augmentant considérablement la précision et la vitesse de détection.

Parallèlement, le concept de contrôle des maladies évolue des solutions chimiques unilatérales vers une gestion intégrée, écologiquement et évolutivement raisonnée. He et al. (2016) soulignent qu'une gestion durable doit "créer des conditions favorables à la croissance des plantes et défavorables à la reproduction et à l'évolution des agents pathogènes", combinant Résistance, Évitement, Élimination, Remédiation (RAER). Les nouvelles tendances incluent la lutte biologique,

les extraits de plantes, les approches génétiques, les modèles prédictifs et les systèmes d'aide à la décision numérique (Mukhtar et al., 2023).

Dans ce contexte, les avancées scientifiques contemporaines dans deux directions clés sont résumées :

(1) le diagnostic des maladies des plantes, incluant les méthodes classiques, optiques et basées sur l'IA ;

(2) le contrôle et la gestion intégrée, considérant les approches écologiques, biologiques, génétiques et technologiques.

Cette double focalisation permet de retracer comment les progrès en diagnostic soutiennent une gestion des maladies plus précise, durable et adaptative dans le contexte d'agroécosystèmes en évolution dynamique.

Un diagnostic efficace est le fondement de toute stratégie de gestion des maladies. Il détermine la bonne décision, minimise les pertes et permet une intervention précoce pour le contrôle. Comme le soulignent Balodi et al., (2017), "la science du diagnostic des maladies a évolué de l'inspection visuelle... vers des techniques sérologiques et moléculaires hautement sensibles." Les approches modernes peuvent être regroupées en trois directions principales : les méthodes de laboratoire classiques, les technologies optiques et à distance, et l'intelligence artificielle.

Les techniques sérologiques telles que l'ELISA, l'immunofluorescence et les tests immunochromatographiques rapides restent largement utilisées en raison de leur spécificité et de leur applicabilité sur le terrain. L'ELISA est l'une des méthodes les plus répandues, où "le changement de couleur visuel permet une détection facile" (Fang & Ramasamy, 2015). Cependant, la sensibilité pour les agents pathogènes bactériens est limitée.

Les méthodes moléculaires, en particulier la PCR et ses variantes (nichée, multiplex, temps réel), offrent la plus haute précision. Balodi et al., (2017) notent que les analyses basées sur la PCR sont "spécifiques, sensibles, efficaces, rapides et relativement économiques." La PCR en temps réel permet une évaluation quantitative et est particulièrement précieuse pour les tests sur semences et les agents pathogènes de quarantaine.

Les plateformes de phénotypage (fluorescence chlorophyllienne, imagerie hyperspectrale et thermique) permettent une observation non destructive et répétée. Selon Balodi et al., (2017) "ces méthodes sont non destructives... et permettent la visualisation de réactions localisées." Le diagnostic hyperspectral est particulièrement prometteur pour la détection précoce, car il capture les changements physiologiques avant l'apparition de symptômes visibles.

Fang et Ramasamy (2015) soulignent que les techniques hyperspectrales "sont largement utilisées pour identifier les maladies grâce aux changements de réflectance." La thermographie et la fluorescence complètent l'analyse mais sont sensibles aux conditions externes et nécessitent souvent une combinaison avec d'autres méthodes.

Ces dernières années, l'apprentissage profond est devenu un outil clé pour la reconnaissance automatique des maladies. Li et al., (2021) notent que "l'apprentissage profond évite les inconvénients de la sélection manuelle des caractéristiques... et rend l'extraction des caractéristiques plus objective." Les architectures CNN telles qu'AlexNet, GoogLeNet, ResNet et DenseNet atteignent des précisions supérieures à 95-99 % sur des ensembles de données contrôlés. Saleem et al., (2019) montrent que GoogLeNet surpasse AlexNet sur PlantVillage, et Demilie (2024) conclut que les CNN "sont souvent le choix préféré... en raison de leur capacité à capturer des hiérarchies spatiales." Cependant, les conditions réelles sur le terrain restent un défi et nécessitent des modèles plus complexes combinés à des capteurs à distance et des systèmes prédictifs.

Les stratégies de contrôle modernes évoluent des approches dominées par la chimie vers des systèmes intégrés, écologiquement orientés et évolutivement durables. L'objectif principal est de réduire la pression des agents pathogènes tout en maintenant la productivité et l'équilibre écologique.

Le changement climatique modifie l'épidémiologie des maladies et nécessite des stratégies adaptatives. Juroszek et von Tiedemann (2011) notent que "les mesures préventives... pourraient devenir particulièrement importantes à l'avenir." Mukhtar et al., (2023) soulignent que la GIPD (Gestion Intégrée des Plantes et des Dépérissements) est "la méthode la plus appropriée et pertinente dans les circonstances actuelles." Les nouvelles tendances incluent : les extraits de plantes – par ex., *Lantana camara*, dont les extraits "suppriment la croissance de *Pyricularia oryzae* et *Xanthomonas* spp." ; les approches génétiques – l'expression de régulateurs comme

AtMYB12, qui "augmente les niveaux de flavonoïdes et la résistance à plusieurs agents pathogènes" ; la résistance dérivée de l'agent pathogène (PDR) – stratégies transgéniques contre les virus.

Le diagnostic et les systèmes basés sur l'IA soutiennent la gestion par : la détection et la localisation précoces des foyers ; la réduction des traitements inutiles ; l'intégration avec des modèles prédictifs ; le suivi de l'efficacité et de la résistance.

Comme le note Demilie (2024), l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond "améliorent les performances et la vitesse de détection et de classification", en faisant un composant clé des systèmes modernes de GIP.

La synergie entre le diagnostic moderne et la gestion intégrée crée de nouvelles opportunités pour une agriculture précise, efficace et écologiquement durable. Cette combinaison permet non seulement de réduire les pertes, mais aussi de construire des agroécosystèmes plus résilients capables de répondre aux défis futurs.

Matériels et Méthodes

Les principaux agents pathogènes affectant les cultures maraîchères sont les virus (TSWV, ToMV, PMMoV, PVY), les bactéries (*Xanthomonas*, *Pseudomonas*, *Clavibacter*) et les champignons pathogènes tels que *Phytophthora*, *Fusarium*, *Verticillium*, *Alternaria* et *Botrytis* (Figure 1).



Figure 1. Symptômes du mildiou de la pomme de terre, de la verticilliose sur poivron, des taches bactériennes sur poivron, du chancre bactérien sur tomate

Le changement climatique conduit à une "augmentation des températures → développement plus rapide des agents pathogènes" et à des "saisons de croissance plus longues → plus de cycles d'infection." À des fins de diagnostic, des méthodes traditionnelles et modernes ont été utilisées. L'évaluation initiale était le diagnostic visuel, rapide mais subjectif, car "les symptômes peuvent se chevaucher entre différents agents pathogènes ou facteurs abiotiques." La microscopie a été appliquée pour observer les structures morphologiques, avec une coloration spécifique utilisée dans certains cas. Des milieux de culture ont été utilisés pour isoler les bactéries et les champignons, tandis que les virus étaient diagnostiqués à l'aide de tests immunochromatographiques.

Les tests immunochromatographiques rapides utilisés étaient : AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® et LOEWE® FAST, qui permettent la détection de virus, de bactéries et de certains champignons pathogènes en 5 à 10 minutes et sont "adaptés au terrain et au laboratoire" (Figure 2).



Figure 2. Tests immunochromatographiques rapides : AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® et LOEWE®FAST

Pour la confirmation des résultats, les méthodes moléculaires (PCR, qPCR, LAMP) sont recommandées, distinguées par une "très haute sensibilité" et une "haute spécificité", mais nécessitant un laboratoire spécialisé. Les méthodes hyperspectrales pour la détection précoce des infections et l'évaluation du stress physiologique sont largement utilisées, la technologie étant définie comme "non invasive, rapide et évolutive." Des drones équipés de capteurs RVB, multispectraux, hyperspectraux et thermiques ont été utilisés pour la surveillance au champ, la cartographie des maladies et l'évaluation de la biomasse. Des modèles prédictifs basés sur la température, l'humidité, les précipitations et le microclimat ont été utilisés pour prévoir le risque d'infection et optimiser le calendrier des traitements. Sont largement utilisés en production maraîchère les biofongicides (par ex., *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum*, *Pythium oligandrum*), les biostimulants (acides aminés, algues, acides humiques) et les fongicides chimiques (produits à base de cuivre, Mancozèbe, Azoxystrobine, Difénoconazole, etc.).

Résultats

L'influence du changement climatique sur la dynamique des agents pathogènes et la fréquence des maladies dans les cultures maraîchères est clairement exprimée. L'augmentation des

températures accélère le développement de nombreux agents pathogènes, et des hivers plus doux augmentent la survie de l'inoculum. Les précipitations extrêmes créent des conditions favorables au développement des maladies fongiques et bactériennes, car "une humidité élevée > 90 % accélère la sporulation", et les gouttes de pluie facilitent la propagation à longue distance des bactéries. La sécheresse entraîne un stress physiologique et des micro-fissures dans les feuilles et les racines, qui facilitent la pénétration des agents pathogènes – "le stress sec provoque des micro-fissures... points d'entrée pour les bact