

Introduction

Le mildiou, causé par l'oomycète *Phytophthora infestans*, demeure la maladie la plus destructrice pour la culture de la pomme de terre à l'échelle mondiale (Pellé et al., 2005). Il peut entraîner une défoliation rapide des plants, affecter les tiges, compromettre significativement les rendements, et provoquer la pourriture des tubercules, impactant tant la qualité que la quantité de la récolte. Sa gestion repose principalement sur l'application répétée de fongicides, avec en moyenne 12 à 15 traitements par saison dans les climats modérément humides comme ceux du nord-ouest de l'Europe, et jusqu'à 20 applications lors d'années particulièrement pluvieuses (Goffart et al., 2022). Par ailleurs, même l'agriculture biologique repose encore fortement sur l'utilisation de fongicides à base de cuivre (Nechwatal & Zellner, 2015), malgré leurs effets négatifs sur les micro-organismes du sol (Rehman et al., 2019). Or, l'usage du cuivre est appelé à être progressivement réduit, voire interdit à moyen terme, en raison de son impact environnemental et de sa toxicité pour les sols. Cette perspective renforce encore l'importance du développement et de l'évaluation de variétés résistantes au mildiou dites « plus robustes », afin de garantir une protection durable des cultures dans tous les systèmes agricoles.

Dans ce contexte, l'évaluation au champ de variétés de pomme de terre plus robustes s'avère indispensable. Cette évaluation vise à observer le comportement des variétés dans des conditions de pression naturelle de la maladie, afin de mieux orienter les choix variétaux pour des systèmes de culture moins dépendants des intrants chimiques.

Plusieurs protocoles d'évaluation de la résistance variétale au mildiou sont déjà disponibles, notamment ceux développés par le CIP (https://www.researchgate.net/publication/263426295_Field_assessment_of_resistance_in_potato_to_Phytophthora_infestans_International_cooperators_guide#fullTextFileContent) ou par l'INRAE (<https://revue-novae.fr/article/download/9024/43337>) ou encore dans le cadre de l'inscription des variétés de pomme de terre dans le catalogue national belge (https://agriculture.wallonie.be/files/20182/21849/Protocole_Pomme%20de%20terre%20Fr_2022.pdf). Toutefois, une harmonisation plus spécifique à l'échelle transfrontalière était nécessaire pour répondre aux besoins du groupe de travail (réunissant le CRA-W, la FIWAP, Bio Wallonie, Viaverda, Bio Hauts-de-France, la FREDON Hauts-de-France, BioForum, Inagro ainsi que la Chambre d'agriculture du Nord-Pas-de-Calais) sur les variétés robustes mis en place dans le cadre du projet PROROB (Interreg France-Wallonie-Vlaanderen).

Ce protocole s'inscrit donc dans une logique de travail collaboratif et transdisciplinaire, visant à fournir un cadre commun pour la mise en œuvre des essais d'évaluation en plein champ. Il vise à :

- Faciliter l'organisation et le suivi des essais entre les partenaires du micro-projet (CRA-W, Inagro, Chambre d'Agriculture du Nord-Pas-de-Calais), ainsi qu'à l'échelle plus large du groupe de travail des « pommes de terre robustes »
- Assurer une cohérence des notations,
- Améliorer la comparabilité et la valorisation des résultats à l'échelle transfrontalière.

1. *Phytophthora infestans* :

a. Caractéristiques du pathogène et cycle de vie

Phytophthora infestans est un pathogène hémibiotrophe avec un développement en deux phases. Une phase biotrophe, impliquant la colonisation de tissus vivants, et une phase nécrotrophe, caractérisée par des dégradations de tissus colonisés pouvant mener à la destruction complète des plantes en peu de temps.

Dans des conditions climatiques favorables — notamment une humidité relative supérieure à 90 % et des températures comprises entre 15 et 22 °C — *Phytophthora infestans* peut réaliser plusieurs cycles de reproduction asexuée (Le Vourch et al., 2025). Il présente un fort potentiel de sporulation, permettant une dissémination rapide via des propagules asexuées appelées sporanges, transportées par le vent (Aylor et al., 2001 ; Fry, 2020). Ces sporanges sont produits dans les tissus infectés en conditions humides, puis libérés dans l'air (Aylor et al., 2001). Ils peuvent parcourir au moins 90 mètres en hauteur et 500 mètres sous le vent, voire jusqu'à 700 kilomètres dans certaines conditions extrêmes (Aylor et al., 2011 ; Severns et al., 2019).

Après avoir atteint les tissus de la plante hôte, les sporanges peuvent libérer des zoospores mobiles ou germer directement après enkystement. Dans les deux cas, un tube germinatif est formé, pénétrant les tissus végétaux et amorçant la croissance du mycélium (Fry, 2008).

Phytophthora infestans est une espèce hétérothallique, nécessitant la présence de deux souches de types sexuels opposés (A1 et A2) pour réaliser la reproduction sexuée. Celle-ci conduit à la formation d'oospores, structures à paroi épaisse capables de survivre dans le sol durant des périodes défavorables telles que le gel ou la sécheresse (Fry, 2020).

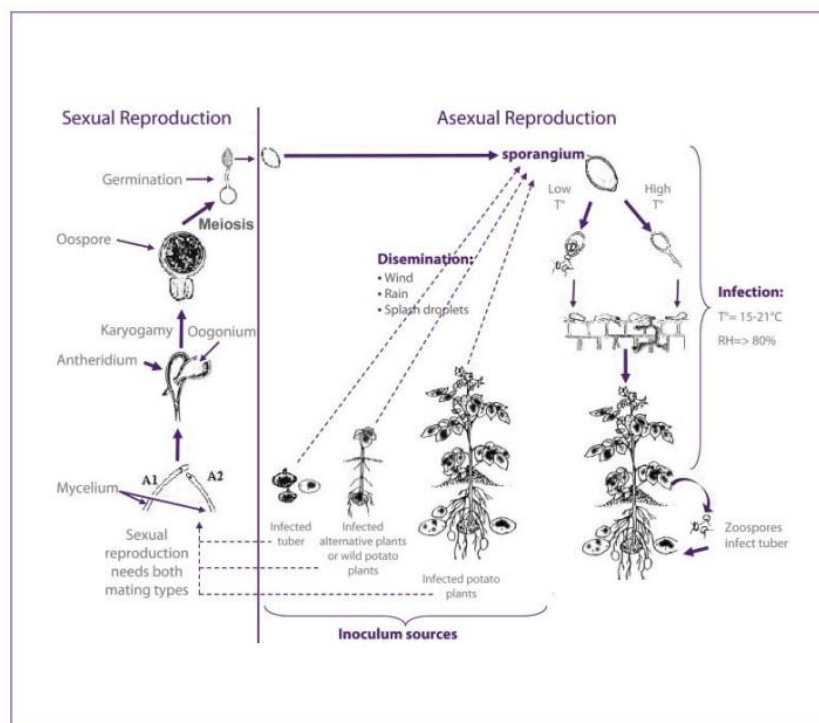


Figure 1: Cycle de vie du *Phytophthora infestans* (Bron: CIP (2010))

b. Symptômes :

Les symptômes varient selon l'âge de la lésion, les conditions environnementales antérieures à l'observation et le type de tissu touché.

- Sur les feuilles

Les symptômes du mildiou sur les feuilles de pomme de terre apparaissent initialement sous forme de lésions irrégulières, de couleur vert pâle (Figure 2a), souvent localisées près des bords ou des pointes des feuilles (Gevens et al., 2013). Ces lésions, mesurant entre 2 et 10 mm à un stade très précoce, peuvent être entourées d'un léger halo de tissu vert altéré mais non nécrosé. Elles s'élargissent rapidement pour former de grandes taches nécrotiques de couleur brun foncé à noir violacé (Figure 2b). Les lésions se développent généralement en forme plus circulaire et restent souvent confinées aux bords des folioles. Elles ne sont pas toujours limitées par les nervures, et les plus anciennes sont fréquemment entourées d'un halo de chlorose (Forbes et al., 2014). En matinée, une moisissure blanche composée de sporanges et de spores du pathogène est souvent visible sur la face inférieure des feuilles, notamment autour des bords des lésions (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** c et d). Ces structures fongiques — des sporanges portés par des sporangiophores — émergent par les stomates (Yuen, 2021), facilitant ainsi la dissémination du pathogène vers d'autres tissus foliaires. Après germination, soit directement soit par libération de zoospores mobiles, de nouvelles lésions peuvent apparaître en seulement trois à quatre jours.

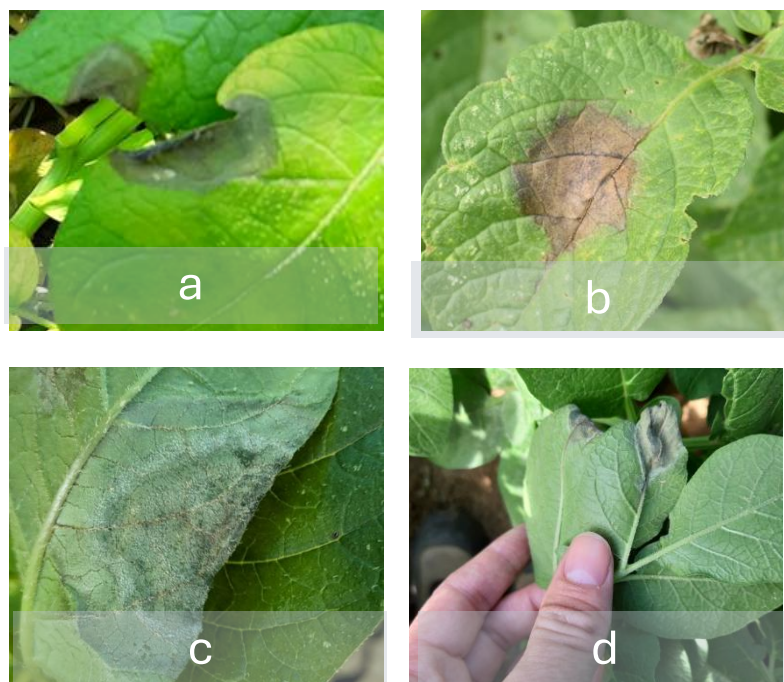


Figure 2: Symptômes du mildiou sur feuille de pomme de terre

- **Sur les tiges**

Le mildiou s'attaque également aux tiges, où il peut provoquer un étranglement, entraînant le flétrissement des feuilles situées au-dessus de la zone infectée. Des lésions de couleur brun clair à brun foncé apparaissent sur les tiges ou les pétioles, s'allongeant progressivement jusqu'à parfois les entourer complètement (Figure 3). Les tissus touchés deviennent alors cassants, et la tige se rompt fréquemment à l'endroit de la lésion (Forbes et al. 2014).



Figure 3: Symptômes du mildiou sur tige de pomme de terre

c. Résistance au mildiou

Deux types de résistance au mildiou ont été décrits chez la pomme de terre : la résistance qualitative et la résistance quantitative (Rauscher et al., 2010). La résistance qualitative ou verticale repose sur des gènes majeurs (gènes R) et est associée à une réponse hypersensible entraînant la mort cellulaire et empêchant ainsi la colonisation ultérieure du tissu de l'hôte. La résistance quantitative, également connue sous le nom de résistance horizontale ou résistance au champ, repose sur plusieurs gènes, chacun ayant un effet relativement faible, mais étant tout de même efficace contre un large spectre de souches de *P. infestans* et stable (Brown et Caligari, 2008 ; Sliwka et Zimnoch-Guzowska, 2013).

2. Conduite des essais d'évaluation de la résistance

- Variétés testées : L'ensemble des variétés de la liste robustes de l'année en cours sera testé. La liste des variétés robustes se trouve sur le site internet de chaque partenaire membre du groupe de travail robustes.

-Variétés de références : 4 variétés de références sont sélectionnées sur base de leur note de sensibilité au mildiou et doivent être incluses dans l'essai d'évaluation, en particulier si l'évaluation est réalisée sur différents lieux ou à différents moments (Forbes et al. 2014). Les notes de sensibilité des variétés de référence sont choisies de manière croissante ; les variétés présentent des notes approximatives à 2, 5, 7 et 9 (allant de sensible à très résistant). Les notes de résistance sont décrites ci-dessous (

Protocole n°1_Protocole d'évaluation de la résistance variétale de pomme de terre au mildiou du feuillage

Tableau 1). De préférence, des variétés ayant les mêmes notes de résistance devraient être utilisées sur tous les sites d'évaluation. Ces variétés doivent présenter une certaine stabilité de réponse au mildiou et doivent donc être réévaluées chaque année afin de sélectionner les références les plus pertinentes.

-Taille des parcelles : La résistance au mildiou peut être évaluée dans de petites parcelles composés entre 25 à 30 plants.

-Gestion agronomique : La fertilisation, le contrôle des mauvaises herbes et des ravageurs, ainsi que toutes les autres activités agricoles doivent être uniformes pour toutes les parcelles de l'essai et conformes aux pratiques agricoles locales en AB. Afin de favoriser le développement du mildiou, l'essai sera réalisé sans application de traitements fongiques, y compris ceux à base de cuivre.

-Conception expérimentale : L'évaluation des variétés doit être réalisée dans un essai avec répétitions, utilisant 3 à 4 répétitions. La résistance au mildiou peut être évaluée à l'aide de tous les designs expérimentaux classiques, tels qu'un design totalement randomisé ou un plan en blocs randomisés (Forbes et al. 2014). Les parcelles expérimentales sont bordées de chaque côté par des lignes constituées d'une variété sensible, telle que Bintje, Vitelotte, Agria, etc (Figure 4Figure 5. Chaque répétition peut être répartie sur 2, 3 ou 4 lignes, en fonction de la superficie disponible.

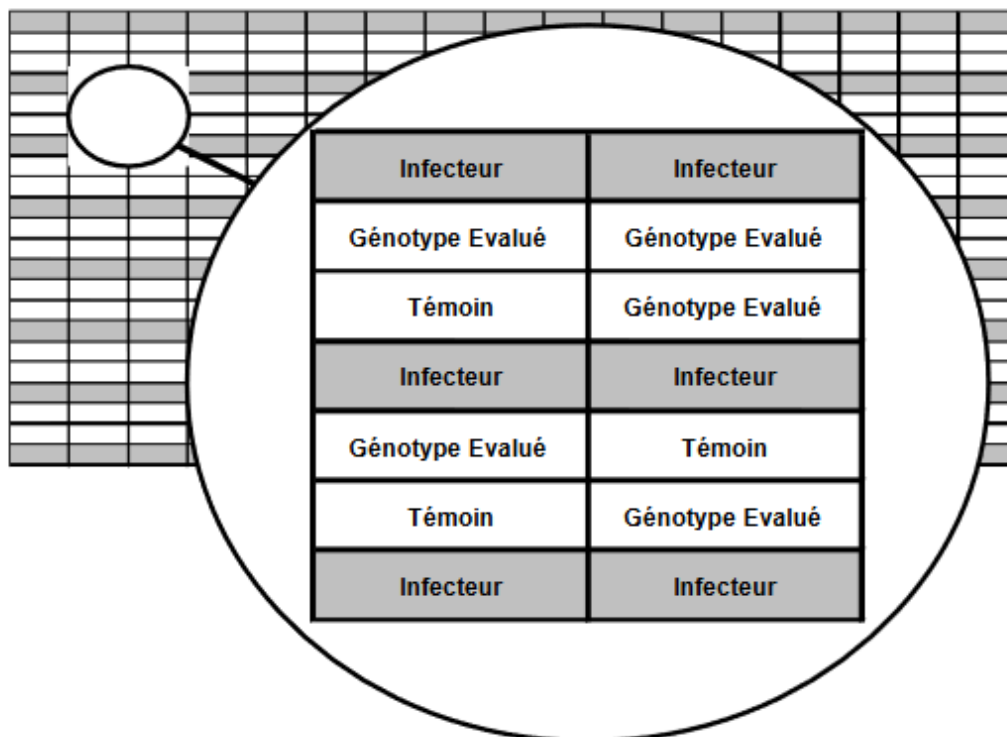


Figure 4: Exemple de dispositif expérimental (Pellé et al., 2005)



Figure 5: Lignes infectrices variété Vitelotte en bordure de l'essai et entre chaque parcelle (Parcelle expérimentale de Gembloux, 21/07/2021).

Les lignes infectrices peuvent introduire certains biais expérimentaux. Par exemple, si la variété utilisée comme ligne infectrice est très sensible au mildiou, elle peut produire une quantité importante de sporanges, augmentant ainsi artificiellement la pression d'infection sur les parcelles voisines. Cela peut donner l'impression que les variétés adjacentes sont plus sensibles qu'elles ne le sont réellement.

Pour limiter ce biais, une solution consiste à placer des plantes inoculatrices entre chaque rangée de test, assurant ainsi une exposition uniforme à l'inoculum pour toutes les variétés. Cependant, cette méthode implique un doublement de la taille de l'expérimentation, ce qui peut poser des contraintes logistiques. Une approche plus équilibrée consiste à veiller à ce que chaque variété soit positionnée à proximité d'au moins une ligne infectrice, afin de garantir une exposition comparable tout en maîtrisant la taille du dispositif expérimental.

3. Caractérisation des conditions climatiques locales

Les conditions climatiques locales sont caractérisées à partir des données recueillies par une station météo installée directement dans le champ d'essai ou, à défaut, à partir des informations fournies par la station de référence la plus proche. Les données relatives à la température, à l'humidité relative et aux précipitations sont essentielles pour interpréter les résultats liés au développement du mildiou.

4. Caractérisation des souches de *Phytophthora infestans* présentes

Il est également intéressant de caractériser les souches de *Phytophthora infestans* (agent du mildiou) présentes dans la parcelle. Cette caractérisation peut être réalisée en s'appuyant sur les outils et ressources proposés par le réseau **EuroBlight**, afin d'identifier la diversité génétique et la virulence des souches en présence.

5. Gestion des conditions climatiques pour favoriser l'infection au mildiou dans le cadre de l'essai

En cas de climat défavorable au mildiou, plusieurs mesures doivent être mises en place pour favoriser la présence de l'infection et maintenir un niveau d'infection adéquat au sein de la

parcelle expérimentale. Ces actions visent à recréer des conditions propices au développement de la maladie, afin d'assurer la validité des résultats de l'essai.

a. Apports hydriques

Afin de créer un environnement favorable au développement du mildiou, il est essentiel de maintenir une humidité constante au sein de la parcelle expérimentale. En fonction des moyens disponibles, cela peut être réalisé par brumisation (création d'un brouillard d'eau par brumisateurs) ou par irrigation, à condition que celle-ci soit bien maîtrisée pour éviter les excès d'eau localisés.

La brumisation est particulièrement efficace pour maintenir une humidité élevée à la surface des plantes, sans saturer le sol, et se distingue donc nettement de l'irrigation classique, qui consiste à apporter un volume important d'eau en un court laps de temps. En cas de températures élevées, il est recommandé de privilégier des irrigations tardives (en fin de journée ou en soirée), afin de limiter l'évaporation et de favoriser la persistance de l'humidité pendant la nuit, période propice à l'infection par le mildiou.

b. Inoculation

L'inoculation consiste à introduire volontairement des souches de mildiou sur la parcelle pour favoriser les infections dans les parcelles testées. Plusieurs méthodes d'inoculation peuvent être utilisées :

- **Pulvérisation de souches** : Cette méthode consiste à pulvériser des souches de mildiou directement sur les plantes.
- **Apport de feuilles contaminées** : Des feuilles de pommes de terre sont inocuées en laboratoire et introduites dans les parcelles lorsque ces feuilles sont en phase de sporulation. Elles sont placées sur les lignes infectrices des parcelles expérimentales pour favoriser la propagation de l'infection (Figure 5).



Figure 6: Inoculation au champ à partir de folioles présentant des sporulations, puis placée dans un sac plastique afin de favoriser une forte humidité.

Il est essentiel de veiller à ce que l'inoculation n'introduise pas de biais dans l'essai. Les souches doivent être appliquées de manière homogène afin de ne pas favoriser certaines variétés au détriment d'autres. De plus, il convient de prêter une attention particulière aux souches utilisées pour l'inoculation, en s'assurant qu'elles correspondent aux dernières souches présentes en Europe.

6. Évaluation de la sévérité de la maladie et cotations

a. Méthodologie d'observation

La sévérité de la maladie est évaluée en estimant le pourcentage de la surface foliaire infectée. Cette variable est suivie tout au long de la saison, et la date de chaque observation ou cotation est systématiquement enregistrée.

Les données sont collectées pour chaque variété au sein de chaque répétition. Cette approche permet de suivre l'évolution de la maladie de manière précise et comparative entre les variétés testées. Il est préférable de réaliser les observations en matinée ou par temps nuageux pour une meilleure distinction des symptômes. Une bibliothèque sera disponible en fin de document pour aider l'observateur à distinguer les différents symptômes du mildiou, selon leur stade d'évolution et leur localisation sur la plante.

b. Début et fin des cotations

Les cotations doivent commencer dès que les conditions climatiques deviennent favorables au développement du mildiou. Les chercheurs doivent donc connaître la période habituelle d'apparition du mildiou dans leur région et/ou surveiller les parcelles voisines pour détecter les premiers signes d'infection (Forbes et al., 2014).

Si des symptômes sont observés, les relevés doivent démarrer immédiatement, afin de suivre l'évolution de la maladie dès les premiers stades. Par ailleurs, les systèmes d'avertissement ou

Protocole n°1_Protocole d'évaluation de la résistance variétale de pomme de terre au mildiou du feuillage

de prévision du mildiou, basés sur les conditions météorologiques (température, humidité, pluviométrie), peuvent être utilisés pour aider à déterminer la date optimale de début des observations, en anticipant les périodes à risque élevé d'infection.

Les observations se poursuivent jusqu'à la destruction complète du feuillage de la variété, ce qui marque la fin de la cotation pour celle-ci.

Enfin, pour les variétés hâtives, les cotations doivent être interrompues avant le début de la sénescence naturelle des plantes, afin d'éviter toute confusion entre les effets liés à la maladie et ceux dus au vieillissement physiologique.

c. Fréquence des observations

Les cotations sont utilisées pour calculer l'aire sous la courbe de progression de la maladie (AUDPC), de sorte que des intervalles de temps constants entre les lectures ne sont pas essentiels. Si la maladie progresse rapidement dans les géotypes sensibles, les cotations doivent être effectuées fréquemment (tous les 3 à 4 jours). Si la maladie progresse lentement, l'intervalle entre les observations peut être plus long (tous les 7 à 10 jours).

d. Echelle de cotations

Les observations sont réalisées sur des parcelles de 25 à 30 plantes, en utilisant une échelle de cotation allant de 0 à 10 (en points) ou bien de 0 à 100 (en %), où :

- 10 points ou 0% signifient une végétation saine, sans symptôme de mildiou,
- 0 points ou 100 % indiquent une destruction complète de la végétation par la maladie.

Protocole n°1_Protocole d'évaluation de la résistance variétale de pomme de terre au mildiou du feuillage

Tableau 1.Echelle de cotation

% Atteint	Description	Points
0	Pas de symptôme.	10
0,01	1 à 2 folioles par parcelle (1 foliole/10.000 folioles)	9,90
0,05	3 à 5 folioles par parcelle (ou une pousse terminale atteinte par parcelle)	9,75
0,1	De l'ordre de 10 folioles par parcelle . Premières sporulations	9,50
0,5	En moyenne 1 foliole par plante atteinte (de l'ordre de 25 à 40 folioles par parcelle)	9
1	En moyenne 4 folioles par plante atteintes (de l'ordre de 100 folioles par parcelle). Infection générale légère	8
2,5	En moyenne 8 à 10 folioles par plante atteintes (de l'ordre de 200 à 250 folioles par parcelle).	7
10	En moyenne 1 foliole sur 5 atteintes par plante	6
25	25 % du feuillage est atteint par le mildiou. La végétation est encore d'apparence verte. Toutes les plantes présentent une infection.	5
50	Environ 50 % du feuillage est atteint , la couleur générale de la culture est vert-brun.	4
75	75 % du feuillage est atteint , il reste donc encore 25 % de parties vertes	3
95	Encore quelques parties vertes , notamment quelques tiges.	2
99	Encore quelques folioles vertes , les tiges brunissent ou meurent.	1
100	Végétation complètement détruite.	0

Adapted from: James, C. 1971. A manual of assessment keys for plant diseases. Canada Department of Agriculture. Publication No. 1458

Outre les valeurs entières de l'échelle, des valeurs intermédiaires peuvent également être utilisées (par exemple : 7,5 ou 4,3), afin de permettre une évaluation plus fine et plus précise de l'évolution des symptômes.

Il est important de noter que si, à une date n, des symptômes sont observés (ex. : cotation = 9), mais qu'à une date n+1, ces symptômes ne sont plus visibles, la même cotation que celle de la date n doit être conservée. Cela évite de fausser l'interprétation de la progression de la maladie.

e. Sources d'erreurs dans l'estimation du pourcentage d'infection

L'évaluation du pourcentage d'infection est sujette à plusieurs erreurs potentielles qui peuvent altérer la précision des résultats. Ces erreurs peuvent être regroupées en trois catégories principales :

- **Sous-estimation de l'infection :**

Cette erreur se produit lorsque l'évaluation se limite aux portions de la maladie avec des symptômes visibles encore présents sur la plante. Cependant, les feuilles infectées finissent par tomber, et leur chute dépend probablement de la variété (Forbes et al., 2014). De plus, des tissus infectés peuvent rester verts et asymptomatiques, rendant leur détection difficile. Certains de ces tissus peuvent également être en phase de sporulation, mais ce phénomène n'est pas toujours visible sans un examen très minutieux de la feuille. Ce niveau d'observation est rarement appliqué lors des évaluations standards des variétés (Forbes et al., 2014).

- **Erreur liée à l'évaluation humaine :**

Les recherches ont démontré que les évaluateurs ont tendance à être plus précis lorsqu'ils estiment la maladie à des niveaux de sévérité faibles ou élevés, mais moins précis pour des niveaux intermédiaires (Forbes et al. 2014).

- **Variabilité due à l'évaluateur :**

Pour garantir une cohérence dans les évaluations, il est préférable que toutes les observations d'un même essai soient réalisées par un seul évaluateur expérimenté en évaluation des maladies (Campbell et al. 1990).

7. Calcul AUDPC et rAUDPC

Les méthodes classiques d'évaluation de la résistance au mildiou en pomme de terre sont souvent semi-quantitatives et peu adaptées aux analyses statistiques (Plich & Tatarowska, 2017).

Le calcul de l'AUDPC (area under the disease progress curve), ou encore de la rAUDPC (relative area under the disease progress curve), permet une quantification fiable et standardisée de la progression de la maladie. Le rAUDPC facilite les comparaisons entre essais et variétés. Cette approche est aujourd'hui largement reconnue dans les essais multi-sites (Plich & Tatarowska, 2017). Ces méthodes permettent également de représenter la rapidité et l'agressivité de l'évolution de la maladie.

L'AUDPC est calculée sur la base d'au moins 5 observations informatives, selon la formule proposée par Fry (1978) :

$$AUDPC = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(x_i + x_{i+1})}{2} * (t_{i+1} - t_i) \quad \text{eq1}$$

$$rAUDPC = \frac{AUDPC}{(t_n - t_1) * 100} \quad \text{eq2}$$

Protocole n°1_Protocole d'évaluation de la résistance variétale de pomme de terre au mildiou du feuillage

Où « t » représente le moment de chaque observation, « x » correspond au pourcentage de feuillage atteint à chaque observation, et « n » est le nombre total d'observations.

La variable « t » peut être exprimée en jours julien, jours après plantation, ou jours après émergence, selon le protocole utilisé. Si les cotations sont réalisées en points et non en pourcentage de feuillage atteint le calcul du paramètre rAUDPC doit être multiplié par 10 et non pas 100 tel qu'indiqué par l'équation 2.

Calcul de l'AUDPC et du rAUDPC avec Microsoft Excel

➔ L'AUDPC peut être calculé de tableurs comme Microsoft Excel. Voici un exemple de procédure :

1. Saisir les données d'évaluation de cinq variétés pour chacune des dates d'observation.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2				% destruction du feuillage							
3	Dates de cotations	28-06-24	02-07-24	04-07-24	09-07-24	11-07-24	16-07-24	19-07-24		AUDPC	Raudpc
4	Variété 1	0	0	0	0	0	10	20		70,00	0,03
5	Variété 2	0	0	0	0	0	5	5		27,50	0,01
6	Variété 3	5	20	35	50	70	85	85		1080,00	0,51
7	Variété 4	2	2	10	15	32	55	70		534,50	0,25
8	Variété 5	1	1	5	10	30	50	70		467,50	0,22
9											

2. Placer le curseur dans la cellule J4, qui correspond à l'AUDPC de la variété 1, et entrer la formule suivante :

$$\text{AUDPC}_{\text{variété1}} = ((C4+B4)/2)*(\$C\$3-\$B\$3) + ((D4+C4)/2)*(\$D\$3-\$C\$3) + ((E4+D4)/2)*(\$E\$3-\$D\$3) + ((F4+E4)/2)*(\$F\$3-\$E\$3) + ((G4+F4)/2)*(\$G\$3-\$F\$3) + ((H4+G4)/2)*(\$H\$3-\$G\$3)$$

3. Copier la formule de la cellule J4 dans les cellules J5 à J8 pour les autres variétés.

➔ Le paramètre rAUDPC est calculé à partir du même tableau que l'AUDPC

1. Placer le curseur dans la cellule K4, correspondant au rAUDPC de la variété 1 et entrer la formule suivante :

$$\text{rAUDPC}_{\text{variété1}} = J4/((\$H\$3-\$B\$3)*100)$$

Cela divise l'AUDPC par la surface maximale possible entre les deux dates extrêmes (durée × 100%).

2. Copier la formule de la cellule K4 dans les cellules K5 à K8 pour les autres variétés.

a. Traitement statistique des données

Les valeurs d'AUDPC, ainsi que les pourcentages d'infection, peuvent être soumises à une analyse de la variance (ANOVA). Avant cette analyse, une exploration statistique est recommandée : calcul des moyennes, écarts-types, distributions de fréquence et visualisation via des diagrammes en boîte (*box plots*). Des tests de comparaison multiple, comme le test de Dunnett, peuvent ensuite être appliqués pour comparer les variétés entre elles. Une analyse des résidus est également préconisée pour vérifier la validité du modèle statistique et tester l'homogénéité des variances (Forbes et al., 2014).

L'AUDPC et les pourcentages d'infection sont des variables pseudo-quantitatives à structure hiérarchique ; elles peuvent donc être analysées sans transformation préalable (Jeger et al., 2001).

b. Interprétation des résultats

L'AUDPC fournit une mesure intégrée de l'évolution de la maladie tout au long de la saison. Exprimée en %-jours, elle correspond à l'accumulation des pourcentages d'infection au fil du temps.

Plus la valeur d'AUDPC est élevée, plus le niveau de sensibilité du génotype au mildiou est important.

Afin de mieux caractériser les profils de résistance, il est souvent pertinent de tracer une courbe de progression de la maladie, représentant l'évolution du pourcentage de feuillage infecté au cours des différentes dates d'observation. Ce graphique permet une visualisation dynamique de la réponse des génotypes testés (Forbes et al., 2014).

c. Corrélation avec d'autres variables

Lorsque les données de rendement sont disponibles, il est pertinent d'évaluer leur corrélation avec l'AUDPC, notamment via le coefficient de Spearman. Cette méthode, basée sur le classement des observations, permet d'examiner si les variétés les moins sensibles au mildiou conservent également de bonnes performances agronomiques (Forbes et al., 2014). Un coefficient de Spearman proche de 1,0 indique une forte corrélation entre baisse du rendement et augmentation de la sévérité de la maladie.

8. Échelle de résistance standardisée : une alternative aux classes descriptives

À l'échelle mondiale, il n'existe pas de système universel permettant de mesurer précisément le degré de résistance des génotypes de pomme de terre à *Phytophthora infestans*. Les variétés sont généralement classées de manière descriptive en résistantes, modérément résistantes ou sensibles (Forbes et al., 2014).

Bien que ces catégories soient utiles à titre indicatif, elles présentent plusieurs limites :

- Elles ne permettent pas une comparaison précise entre génotypes ou entre sites d'essais.
- Elles ne sont pas suffisamment fines pour appuyer des décisions agronomiques, notamment en matière de gestion des fongicides.

Protocole n°1_Protocole d'évaluation de la résistance variétale de pomme de terre au mildiou du feuillage

Pour répondre à cette problématique, Yuen et Forbes (2009) ont proposé une échelle numérique de 0 à 9, basée sur les valeurs d'AUDPC ou rAUDPC. Cette échelle permet une standardisation plus rigoureuse des niveaux de résistance, notamment dans les essais multi-sites.

La valeur de l'échelle de résistance est obtenue via la formule suivante :

$$Sx = Sy \frac{Dx}{Dy} \quad \text{eq.3}$$

Où :

- Sy = valeur de susceptibilité attribuée au témoin (généralement 9 pour un génotype très sensible)
- Dy= valeur d'AUDPC ou rAUDPC observée pour ce témoin
- Dx = valeur d'AUDPC ou rAUDPC du génotype étudié
- Sx = valeur de susceptibilité calculée pour le génotype étudié

Références bibliographiques

- Aylor, D. E., Fry, W. E., Mayton, H., & Andrade-Piedra, J. L. (2001). Quantifying the aerial dissemination of *Phytophthora infestans* sporangia from potato plants. *Phytopathology*, 91(12), 1211–1218. <https://doi.org/10.1094/PHTO.2001.91.12.1211>
- Aylor, D. E., Taylor, G. S., & Boehm, M. J. (2011). An aerobiological framework for assessing the risk of pathogen movement through the air. *Phytopathology*, 101(6), 614–622. <https://doi.org/10.1094/PHTO-09-10-0252>
- Campbell, C. L., & Madden, L. V. (1990). *Introduction to Plant Disease Epidemiology*. John Wiley & Sons.
- Drenth, A., Turkensteen, L. J., & Govers, F. (1995). The occurrence of the A2 mating type of *Phytophthora infestans* in the Netherlands; significance and consequences. *European Journal of Plant Pathology*, 101(6), 659–669. <https://doi.org/10.1007/BF01874864>
- Fernández-Pavía, S. P., Grünwald, N. J., Diaz-Valasis, M., Cadena-Hinojosa, M. A., & Fry, W. E. (2004). Genetic structure of *Phytophthora infestans* populations in Mexico. *Phytopathology*, 94(4), 376–382. <https://doi.org/10.1094/PHTO.2004.94.4.376>
- Forbes, G., Pérez, W., & Andrade Piedra, J. L. (2014). *Field assessment of resistance in potato to Phytophthora infestans: International cooperators guide*. Lima, Pérou : International Potato Center (CIP). ISBN 978-92-9060-440-2.
- Fry, W. E. (1978). Quantification of general resistance of potato cultivars and fungicide effects for integrated control of potato late blight. *Phytopathology*, 68, 1650–1655.
- Fry, W. E. (2008). *Phytophthora infestans*: The plant (and R gene) destroyer. *Molecular Plant Pathology*, 9(3), 385–402. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2007.00465.x>
- Fry, W. E. (2020). *Phytophthora infestans*: New tools (and old ones) lead to new understanding and precision management. *Annual Review of Phytopathology*, 58, 529–556. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-010820-012703>
- Gevens, A. J., & Seidl, A. C. (2013). First report of late blight caused by *Phytophthora infestans* clonal lineage US-23 on tomato and potato in Wisconsin, United States. *Plant Disease*, 97(6), 839.
- Goffart, J.-P., Haverkort, A., Storey, M., Haase, N., Martin, M., Lebrun, P., et al. (2022). Potato Production in Northwestern Europe (Germany, France, the Netherlands, United Kingdom, Belgium): Characteristics, Issues. Challenges and Opportunities. *Potato Research*, 65(3), 503–547. <https://doi.org/10.1007/s11540-021-09535-8>
- Horsfall, J. G., & Barratt, R. W. (1945). An improved grading system for measuring plant disease. *Phytopathology*, 35, 655.

Protocole n°1_Protocole d'évaluation de la résistance variétale de pomme de terre au mildiou du feuillage

Jeger, M. J., & Viljanen-Rollinson, S. L. H. (2001). The use of the area under the disease progress curve (AUDPC) to assess quantitative disease resistance in crop cultivars. *Theoretical and Applied Genetics*, 102, 32–36.

Le Vourch, V., Decroës, A., Thonon, S., Lienard, C., Van Steenberghe, C., Rosillon, D., ... & Legrève, A. (2025). Spatiotemporal dynamics of *Phytophthora infestans* airborne inoculum in Belgium. *European Journal of Plant Pathology*, 171(2), 323–340.

Nechwatal, J., & Zellner, M. (2015). Potential suitability of various leaf treatment products as copper substitutes for the control of late blight (*Phytophthora infestans*) in organic potato farming. *Potato Research*, 58(3), 261–276. <https://doi.org/10.1007/s11540-015-9302-8>

Pellé, R., Bozec, M., Andrivon, D., Soyer, J., & Ellissèche, D. (2005). Méthode d'appréciation du comportement variétal vis-à-vis des bioagresseurs. *Cahier des techniques*, numéro spécial, 73.

Plich, J., & Tatarowska, B. (2017). Field evaluation of potato resistance against *Phytophthora infestans* under natural infection pressure. *Plant Breeding and Seed Science*, 76, 25–28.

Rehman, M., Liu, L., Wang, Q., Saleem, M. H., Bashir, S., Ullah, S., & Peng, D. (2019). Copper environmental toxicology, recent advances, and future outlook: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 18003–18016. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05073-6>

Severns, P. M., Sackett, K. E., Farber, D. H., & Mundt, C. C. (2019). Consequences of long-distance dispersal for epidemic spread: patterns, scaling, and mitigation. *Plant Disease*, 103(2), 177–191. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-18-0505-FE>

Yuen, J. (2021). Pathogens which threaten food security: *Phytophthora infestans*, the potato late blight pathogen. *Food Security*, 13(2), 247–253.